

## ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ГРЕНЛАНДСКИХ КИТОВ НА АРКТИЧЕСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2019 г. В. А. Григорьев<sup>а</sup>, \* , А. А. Луньков<sup>б</sup>, В. Г. Петников<sup>б</sup>, \*\*, А. В. Шатравин<sup>с</sup>

<sup>а</sup>Воронежский государственный университет,  
Университетская пл. 1, Воронеж, 394018 Россия

<sup>б</sup>Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской Академии Наук,  
ул. Вавилова 38, Москва, 119991 Россия

<sup>с</sup>Институт Океанологии им. П.П. Ширшова Российской Академии Наук,  
Нахимовский проспект 36, Москва, 117997 Россия

\*e-mail: grig4@yandex.ru

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

Поступила в редакцию 15.04.2019 г.

После доработки 23.04.2019 г.

Принята к публикации 07.05.2019 г.

Используя реальные записи сигналов гренландских китов, в рамках численного моделирования рассмотрено распространение этих сигналов в мелководном волноводе арктического типа. Анализировалась степень затухания и искажения сигналов китов с ростом расстояния в условиях: 1) мягкого и жесткого дна, 2) различной глубины погружения кита, 3) поверхностного волнения, 4) аддитивных шумов, 5) приема на одиночный гидрофон и вертикальную антенну. Затухание сигналов оценивалось по изменению уровня звукового давления (*SPL*). Искажение сигналов оценивалось по изменению коэффициента корреляции между спектрограммами принимаемых сигналов и эталонными спектрограммами. Показано, что характеристики затухания и искажения выходных сигналов антенны по сравнению с сигналами одиночного приемника более стабильны и устойчивы к изменениям глубины кита, к возможным в условиях Арктики значительным перепадам скорости звука в дне вдоль акустической трассы, а также к воздействию аддитивных шумов. Полученные результаты могут быть использованы для пассивного мониторинга гренландских китов на арктическом шельфе.

*Ключевые слова:* мелкое море, арктический шельф, гренландский кит, коэффициент корреляции

**DOI:** 10.1134/S0320791919050095

### ВВЕДЕНИЕ

Активное освоение шельфовой зоны Арктики приводит к вмешательству человека в арктическую экосистему и ставит под угрозу жизнь морских животных, в первую очередь тех видов, которые находятся под угрозой исчезновения. К таким видам относится, в частности, гренландский кит (*Balaena mysticetus*, Bowhead whale) [1]. Современная популяция гренландских китов насчитывает около 10 тыс. особей. Основные места обитания — это моря: Чукотское, Берингово и Бофорта. В Охотском море обитает 200–400 китов. Одиночные особи встречаются в Баренцевом море. В прошлые годы, когда киты были более многочисленны, они заходили в Карское море [1].

Гренландские киты способны погружаться на глубину до 200 м и находиться под водой до 40 мин. При этом большую часть времени они проводят под водой. Учитывая эти обстоятельства, а также суровые условия обитания грен-

ландских китов, непосредственное визуальное наблюдение за ними, например, с целью экологического мониторинга, затруднено. Поэтому востребованы дистанционные и, прежде всего, пассивные акустические методы мониторинга, основанные на регистрации звуковых сигналов китов [2].

Для вокального репертуара гренландских китов характерно наличие как одиночных частотно-модулированных сигналов, так и “песен” продолжительностью порядка одной минуты, состоящих из ряда одиночных частотно-модулированных сигналов длительностью 1–3 с. Полный частотный диапазон сигналов лежит в пределах от 20 Гц до 5 кГц, существенная часть репертуара ниже 1 кГц. Пиковые значения уровня сигналов достигают 190 дБ относительно 1 мкПа на расстоянии 1 м [3]. В работе [4] сообщается о 184 типах различных песен гренландских китов, зарегистрированных в течение трехлетних наблюдений. При этом, как правило, некоторые сигналы, составляющие песню, многократно в ней повторя-

ются и могут служить маркером для индивидуального распознавания [5] (в англоязычной литературе сигналы этого типа обозначаются термином *end note*, не имеющим русскоязычного эквивалента).

Один из наиболее распространенных методов автоматического распознавания сигналов морских млекопитающих основан на сравнении спектрограммы<sup>1</sup> анализируемого сигнала с некими обобщенными эталонами [6–8]. Для распознавания сигналов гренландских китов такой подход использовался, например, в [5], и его модификация будет применяться в данной работе. При этом основной задачей будет выяснение влияния канала распространения звука на характеристики распознавания.

С точки зрения акустики океана сигналы, издаваемые китами, распространяются в мелководном планарном волноводе. При этом арктические волноводы отличаются значительным затуханием, связанным с поглощением звука морским дном. Последнее может быть связано с возможной газонасыщенностью донных осадочных пород, что, в свою очередь, приводит к значению скорости звука в дне приблизительно равной или меньшей скорости звука в воде (так называемое мягкое дно) [9–15].

Затухание звука в волноводе зависит от частоты. В результате, помимо общего снижения энергии с расстоянием наблюдается искажение сигналов. Оба фактора – затухание и искажение – могут явиться причиной невозможности надежного распознавания сигналов китов на фоне шумов.

В данной работе для анализа были взяты реальные записи сигналов гренландских китов из базы данных MobySound [16]. Эти сигналы рассматривались как излучаемые и пропускались через модельные волноводы с известными передаточными функциями. В рамках численного моделирования ставилась задача оценить степень затухания и искажения сигналов китов с ростом расстояния в условиях: 1) мягкого и жесткого дна, 2) различной глубины погружения кита, 3) поверхностного волнения, 4) аддитивных шумов, 5) приема на одиночный гидрофон и вертикальную антенну. Затухание сигналов оценивалось по изменению с расстоянием уровня звукового давления (так называемой величины *SPL* – *sound pressure level*). Искажение сигналов оценивалось по изменению с расстоянием коэффициента корреляции между спектрограммами принимаемых сигналов и эталонной спектрограммой.

<sup>1</sup> Спектрограмма сигнала определяется как модуль оконного преобразования Фурье.

## 1. СИГНАЛЫ ГРЕНЛАНДСКИХ КИТОВ

Для анализа были выбраны экспериментальные записи шести однотипных звуковых сигналов гренландских китов, являющихся *end note* сигналами шести различных песен, зарегистрированных в апреле 1988 года у берегов Пойнт Барроу (Point Barrow), Аляска [16]. Спектрограммы и спектры рассматриваемых сигналов показаны на рис. 1. Выбранные сигналы представляют собой фрагменты длительностью 2–2.5 с, относительно стабильные в разных актах излучения на протяжении одной песни и относительно громкие по сравнению с другими типами сигналов китов. Пунктирными линиями на рис. 1 показан диапазон 150–1000 Гц, в котором лежит основная доля энергии сигналов. В дальнейшем только эта полоса частот подлежала рассмотрению. Отношение сигнал/шум в этом диапазоне составляет от 16 до 23 дБ для разных сигналов. Указанные значения получены как отношение среднеквадратического отклонения сигнала кита к среднеквадратическому отклонению шума, рассчитанного непосредственно перед и сразу после акта вокализации.

Заметим, что каждый из шести сигналов на рис. 1 является *end note* сигналом одной из шести песен китов, повторяющимся в течение этой песни несколько раз, а разница во времени регистрации различных песен (их длительность порядка минуты) составляет несколько часов. При этом спектрограммы *end note* сигналов, повторяемых в течение одной песни, визуально более сходны между собой, чем спектрограммы *end note* сигналов из различных песен. На основании справочной информации архива MobySound невозможно сделать вывод о принадлежности рассматриваемых сигналов (см. рис. 1) разным особям, однако для ясности изложения в данной работе условимся считать именно так.

## 2. РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ЗАТУХАНИЕ СИГНАЛОВ КИТОВ В ВОЛНОВОДЕ

Рассмотрим модель плоскостойкого волновода с параметрами водного слоя  $H$ ,  $c$ ,  $\rho$  (толщина слоя, скорость звука, плотность) и донного полупространства  $c_1$ ,  $\rho_1$ ,  $\beta$  (скорость звука, плотность, коэффициент затухания в дне). Начало цилиндрической системы координат поместим на верхнюю поверхность водного слоя (эту границу считаем свободной), ось  $r$  направим горизонтально, ось  $z$  – вертикально вниз. Гренландского кита моделируем как точечный и изотропный источник звука, имеющий координаты  $r = 0$ ,  $z = z_0$ .

При расчетах численные значения параметров волновода принимались равными:  $H = 30$  м,  $c = 1460$  м/с,  $\rho_1/\rho = 1.85$ ,  $c_1 = 1400, 1600$  м/с. Такие значения использовались при расчетах поля в одном из районов Карского моря [13], за исключе-

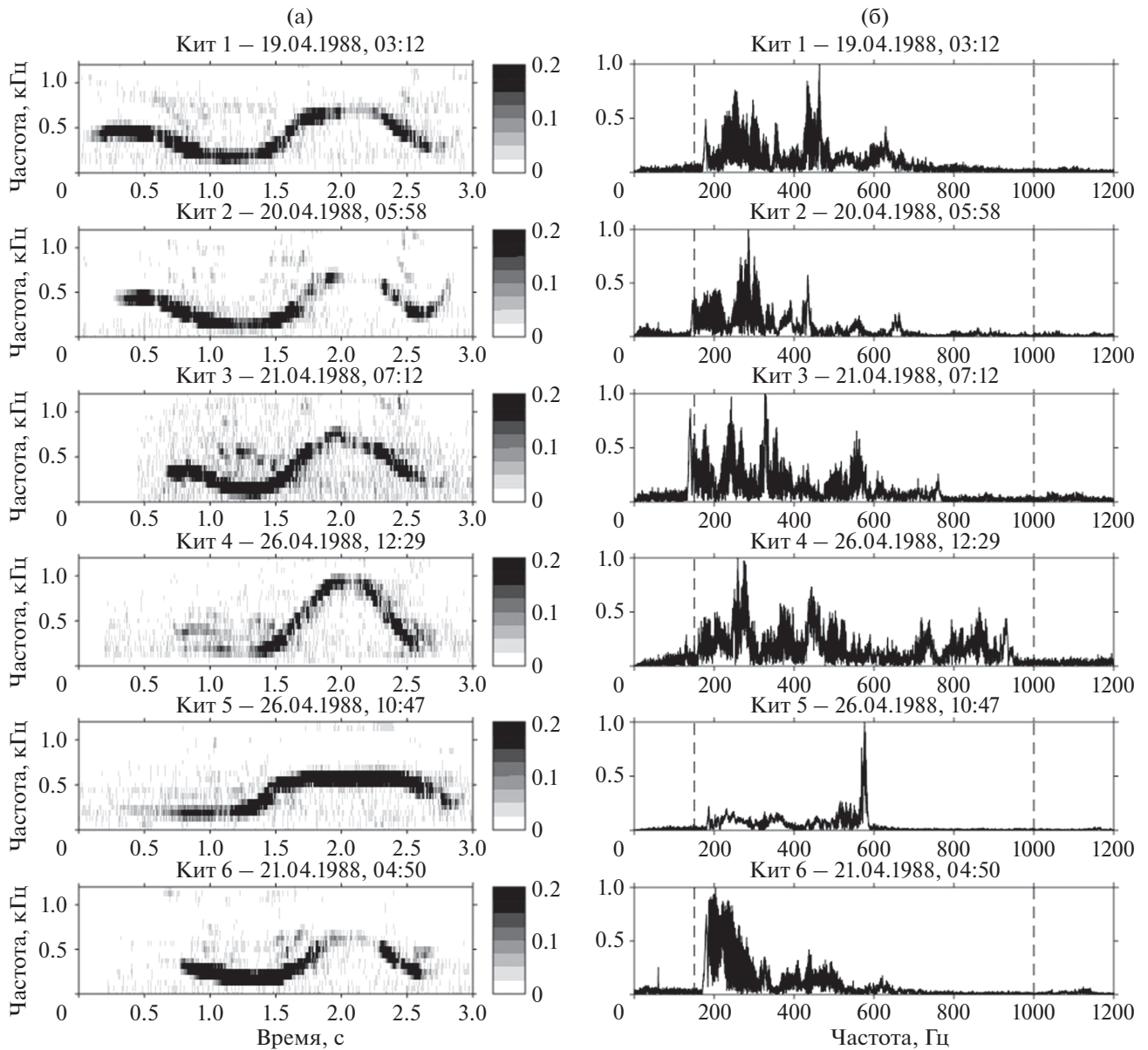


Рис. 1. (а) – Экспериментальные спектрограммы и (б) – спектры шести однопипных сигналов гренландских китов.

нием того, что скорость звука в дне была  $c_1 \geq c$  (жесткое дно). В данной работе выбраны также значения  $c_1 < c$ , чтобы проанализировать распространение сигналов китов в волноводах с мягким дном. Коэффициент затухания полагался зависящим от частоты, как в работах [14, 15, 17], в виде  $\hat{\beta} = 1.07 \times 10^{-4} f^{2.6}$  дБ/км, где  $f$  – частота в Гц.

Пусть  $p_0(t)$  – некоторая экспериментальная запись сигнала кита, показанная в разделе 1, где  $t$  – время. Для определенности будем считать сигнал  $p_0(t)$  имеющим размерность давления, и в дальнейшем анализе будем считать его излучаемым сигналом, пренебрегая тем обстоятельством,

что записи были сделаны на некоторых неизвестных нам расстояниях до китов. (Мы предполагаем, что эти расстояния до китов были относительно невелики, так что сигналы незначительно исказились волноводом.)

Принимаемый в произвольной точке  $(r, z)$  волновода сигнал кита (звуковое давление) обозначим  $p(t)$ . Если  $s_0(\omega) = \mathbf{F}[p_0(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} p_0(t) \exp(i\omega t) dt$  и  $s(\omega) = \mathbf{F}[p(t)]$  – спектры Фурье излучаемого и принимаемого сигналов, где  $\omega = 2\pi f$  – частота, то имеют место равенства:

$$s(\omega) = K(\omega) s_0(\omega), \quad (1)$$

$$K(\omega) = AG(\omega, r, z, z_0), \quad (2)$$

$$p(t) = \int_{-\infty}^{\infty} p_0(\tau) h(t - \tau) d\tau, \quad (3)$$

где  $K(\omega) = F[h(t)]$  – передаточная функция (ПФ) волновода,  $h(t)$  – импульсная характеристика волновода (ИХ),  $G(\omega, r, z, z_0)$  – функция Грина волновода (решение уравнения Гельмгольца с правой частью в виде минус дельта-функции),  $A > 0$  – коэффициент нормировки, имеющий размерность длины, и выбираемый так, чтобы на расстоянии  $R_1 = 1$  м от источника обеспечивался заданный уровень звукового давления  $SPL_0$  сигнала кита (при расчетах выбиралось значение  $SPL_0 = 160$  дБ).

Покажем, как вычислялся коэффициент  $A$  при заданном  $SPL_0$ . Уровень звукового давления сигнала определяется как среднеквадратическое отклонение звукового давления, выраженное в дБ по отношению к 1 мкПа:

$$SPL = 10 \lg \frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p^2(t) dt}{a^2} = 10 \lg \frac{\frac{1}{T\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} |s(\omega)|^2 d\omega}{a^2}, \quad (4)$$

где  $a = 1$  мкПа,  $T = t_2 - t_1$  – длительность сигнала, т.е. интервал времени, в течение которого регистрируется часть сигнала, отвечающая 90% его полной энергии (при численных расчетах выбиралось значение  $T = 2.5$  с),  $\omega_1 \dots \omega_2$  – полоса частот, в которой рассматривается сигнал (150–1000 Гц).

На малых расстояниях от точечного источника  $R = \sqrt{r^2 + (z - z_0)^2}$  функция Грина волновода равна функции Грина бесконечного однородного пространства  $G(\omega, R) = \exp(i\omega R/c)/(4\pi R)$ . Отсюда  $|s(\omega)| = A|s_0(\omega)|/(4\pi R)$ . Следовательно, при  $R = R_1$  и  $SPL = SPL_0$  из (4) получаем

$$A = \frac{4\pi R_1 a}{\sqrt{\frac{1}{T\pi} \int_{\omega_1}^{\omega_2} |s_0(\omega)|^2 d\omega}} = 10^{\frac{SPL_0}{20}}. \quad (5)$$

На достаточно удаленных от источника расстояниях для расчета функции Грина волновода использовалось выражение [11, 18]

$$G(\omega, r, z, z_0) = \frac{i}{4} \sum_{m=1}^M \Psi_m(z_0) \Psi_m(z) H_0^{(1)}(\xi_m r), \quad (6)$$

где  $\Psi_m(z)$  и  $\xi_m$  – собственные функции и собственные значения задачи Штурма–Лиувилля (зависимость от  $\omega$  опущена),  $H_0^{(1)}(\cdot)$  – функция Ханкеля первого рода.

Выражение (6) является приближенным и содержит дискретный спектр первых  $M$  мод. При вычислениях использовался разрез Пекериса, дающий бесконечное число мод [11]. Используемое в (6) количество мод ограничивалось числом<sup>2</sup>:  $M = \{2H/\lambda\}$ , где  $\lambda = c/f$  – длина звуковой волны в воде,  $\{\cdot\}$  – целая часть числа. Как показали расчеты, большего количества мод, а также учета непрерывного спектра при расчете ПФ не требуется на расстояниях  $r \geq 200$  м.

При приеме на одиночный гидрофон расчеты принимаемого сигнала  $p(t)$  проводились согласно (3), где ИХ определялась на основе ПФ обратным преобразованием Фурье. Вычисления ПФ проводились в полосе 150–1000 Гц с шагом 1 Гц. Как показало тестирование, меньшего шага по частоте не требовалось, если соответствующим образом учитывать временную задержку при определении ИХ на удаленных расстояниях.

Помимо приема сигнала на одиночный гидрофон, рассмотрим прием на вертикальную антенну из  $J = 30$  гидрофонов, расположенных на глубинах  $z_j = j\Delta z$ , где  $j = 1, 2, \dots, N$ ,  $\Delta z = 1$  м. Настроим антенну на прием первой моды, т.е. сформируем выходной сигнал антенны в виде:

$$p_a(t) = N_a \operatorname{Re} \sum_{j=1}^J \dot{p}(t, z_j) \bar{\Psi}_1(z_j), \quad (7)$$

где  $\dot{p}(t, z_j)$  – комплексный (аналитический) по отношению к  $p(t, z_j)$  сигнал, принимаемый на глубине  $z_j$ ,  $p(t, z_j) = \operatorname{Re} \dot{p}(t, z_j)$ ,  $\bar{\Psi}_1(z)$  – средняя в полосе  $\omega_1 \dots \omega_2$  собственная функция первой моды,  $N_a = 1/\sum_{j=1}^J |\bar{\Psi}_1(z_j)|$  – нормировочный коэффициент. Если пренебречь мнимой частью  $\bar{\Psi}_1(z)$ , то  $p_a(t) \approx N_a \sum_{j=1}^J p(t, z_j) \operatorname{Re} \bar{\Psi}_1(z_j)$ .

В спектральной области  $s_a(\omega) = F[p_a(t)]$  имеем

$$s_a(\omega) = K_a(\omega) s_0(\omega), \quad (8)$$

$$K_a(\omega) = N_a \sum_{j=1}^J K(\omega, z_j) \bar{\Psi}_1(z_j),$$

где  $K_a(\omega)$  – ПФ волновода при приеме на антенну,  $K(\omega, z_j) = AG(\omega, r, z_j, z_0)$  – ПФ волновода при приеме на глубине  $z_j$ .

На рис. 2 жирной линией показана средняя по частоте действительная часть собственной функции первой моды  $\operatorname{Re} \bar{\Psi}_1(z)$ . Как видно, картина первой моды в целом слабо зависит от скорости

<sup>2</sup> Целое число полуволн, укладываемое на глубине волновода, равно числу незатухающих мод в волноводе с абсолютно жестким или абсолютно мягким дном.

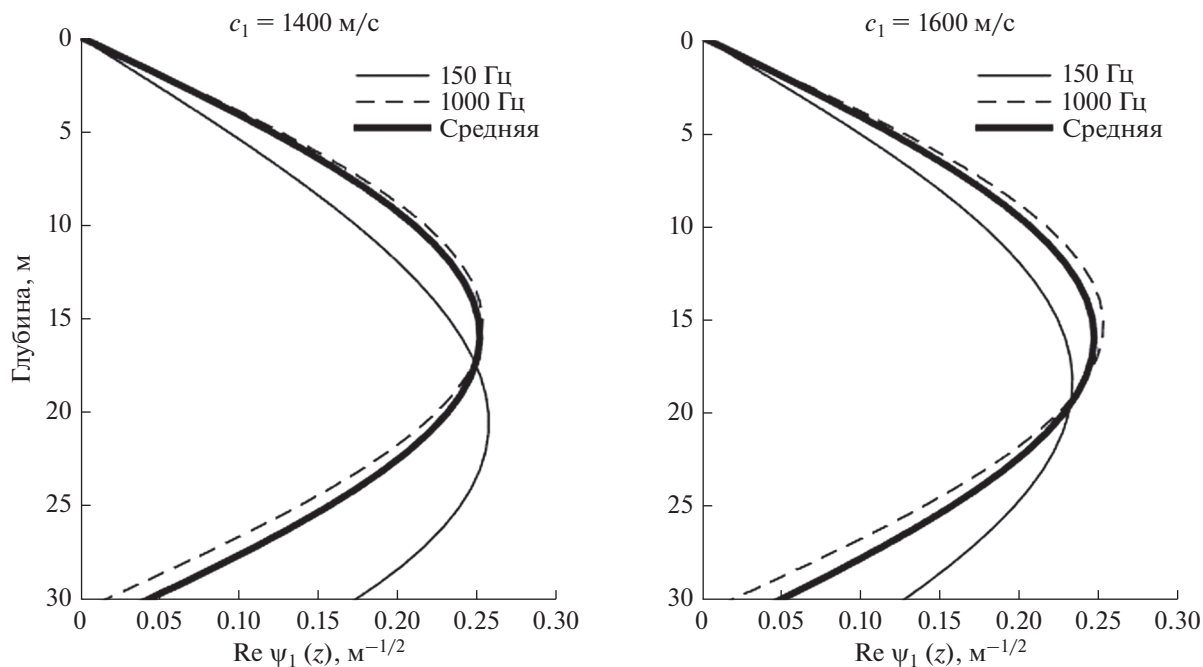


Рис. 2. Действительная часть собственной функции первой моды: для 150 Гц – тонкая сплошная линия, для 1000 Гц – пунктир, средняя в полосе 150–1000 Гц – жирная линия.

звука в дне. Максимум расположен примерно посередине волновода. На глубине 5 м величина  $\text{Re } \bar{\psi}_1(z)$  уменьшается по сравнению с максимумом примерно в 2 раза, на дне – примерно в 6 и 5 раз при  $c_1 = 1400$  и  $1600$  м/с соответственно.

Учитывая доминирующую роль первой моды в принимаемом сигнале, расположение источника и приемника на глубинах вблизи или вдали от максимума первой моды значительно влияет на уровень принимаемого сигнала, что видно из рис. 3.

На рис. 3 изображены зависимости от расстояния величин  $SPL$  и  $SPL_a$  одновременно для шести китов при приеме на одиночный гидрофон и антенну соответственно (величина  $SPL_a$  вычислялась по формуле (4) при подстановке в нее сигнала антенны  $p_a$ ). Расчеты проводились для уровня излучаемого сигнала  $SPL_0 = 160$  дБ, расстояний  $r_0 \leq r \leq r_1$  ( $r_0 = 0.2$  км,  $r_1 = 5$  км), глубин китов  $z_0 = 5, 15.5$  м и глубин одиночного приемника  $z = 15, 30$  м. Отметим, что в работе [3] приводится диапазон уровня end note сигналов песен гренландских китов от 158 до 189 дБ с медианным значением 177 дБ. Таким образом, мы моделируем неблагоприятную для обнаружения ситуацию, и получаемые в дальнейшем оценки дальности идентификации китов можно считать весьма консервативными.

В табл. 1 приведены численные результаты расчетов при приеме на одиночный гидрофон,

где  $SPL(r_1) = \langle SPL(r_1) \rangle \pm \Delta SPL(r_1)$  – уровень принимаемого сигнала на расстоянии 5 км,  $\langle SPL(r_1) \rangle$  – средний (по китам) уровень,  $\Delta SPL(r_1)$  – погрешность, вычисленная по критерию Стьюдента с доверительной вероятностью 95%,  $\beta = \langle SPL(r_0) - SPL(r_1) \rangle / (r_1 - r_0)$  – оценка коэффициента затухания. В табл. 2 приведены аналогичные результаты расчетов величин  $SPL_a(r_1)$  и  $\beta_a$  при приеме на антенну.

Из рис. 3, табл. 1 и табл. 2 можно сделать следующие выводы:

1) В волноводе с мягким дном (1400 м/с) уровни принимаемых сигналов заметно меньше, а ко-

Таблица 1. Уровень звукового давления на 5 км при приеме на одиночный гидрофон

	$z_0 = 5$ м, $z = 15$ м		$z_0 = 5$ м, $z = 30$ м	
	1400 м/с	1600 м/с	1400 м/с	1600 м/с
$SPL(r_1)$ , дБ	$82 \pm 4$	$94.7 \pm 0.4$	$67 \pm 3$	$88 \pm 2$
$\beta$ , дБ/км	7.0	5.3	10.3	6.8
	$z_0 = 15.5$ м, $z = 15$ м		$z_0 = 15.5$ м, $z = 30$ м	
	1400 м/с	1600 м/с	1400 м/с	1600 м/с
$SPL(r_1)$ , дБ	$88 \pm 4$	$101.4 \pm 0.3$	$73 \pm 3$	$92 \pm 2$
$\beta$ , дБ/км	6.5	4.4	8.9	5.7

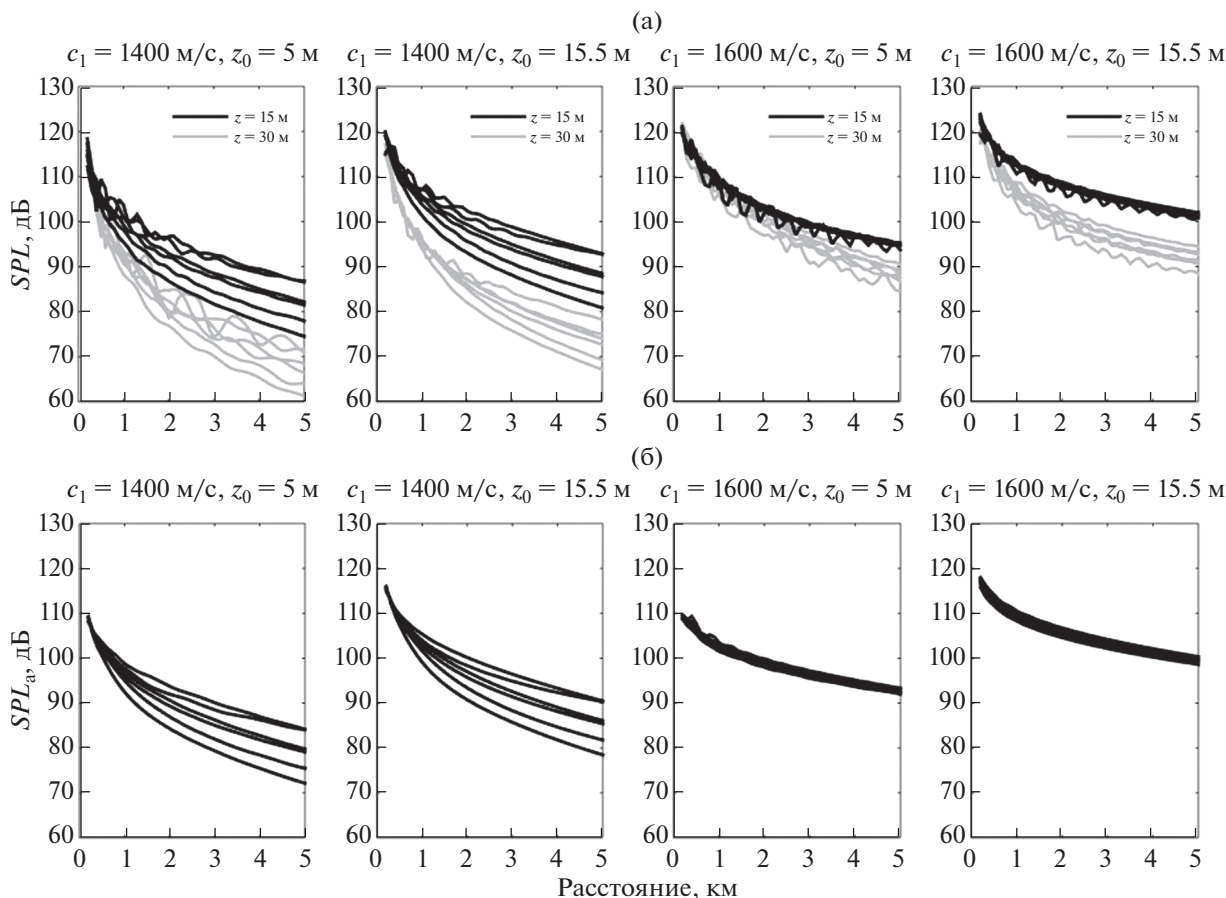


Рис. 3. (а) – Уровни принимаемых сигналов шести китов при приеме на одиночный гидрофон и (б) – антенну. Уровень излучения всех китов 160 дБ.

эффицент затухания заметно больше, чем в волноводе с жестким дном (1600 м/с). Объясняется это близостью скорости звука в дне (1400 м/с) к скорости звука в воде (1460 м/с). В этом случае коэффициент отражения от дна принимает минимальные значения, и велика утечка энергии из водного слоя в дно. Кроме того, в волноводе с мягким дном нет распространяющихся мод (все моды вытекающие). Это дополнительно усиливает затухание в области значений  $c_1 \approx c$ . Более подробно затухание в волноводах с мягким дном анализировалось в [9, 10, 12].

Таблица 2. Уровень звукового давления на 5 км при приеме на антенну

	$z_0 = 5$ м		$z_0 = 15.5$ м	
	1400 м/с	1600 м/с	1400 м/с	1600 м/с
$SPL_a(r_1)$ , дБ	$79 \pm 4$	$92.7 \pm 0.4$	$85 \pm 4$	$99.5 \pm 0.5$
$\beta_a$ , дБ/км	6.2	3.5	6.3	3.6

2) При расположении источника вблизи максимума первой моды затухание сигнала антенны и сигнала одиночного приемника, расположенного вблизи максимума первой моды, примерно совпадают (при одном и том же значении  $c_1$ ).

3) При приеме на одиночный гидрофон одновременное расположение источника и приемника вблизи максимума первой моды дает максимальный уровень принимаемого сигнала и минимальный коэффициент затухания. Наоборот, одновременное расположение источника и приемника вблизи границ волновода дает минимальный уровень принимаемого сигнала и максимальный коэффициент затухания. Численные оценки таковы (табл. 1): при вариации глубин источника и приемника ( $z_0 = 5-15.5$  м,  $z = 15-30$  м) и при  $c_1 = 1400$  м/с (1600 м/с) максимальное изменение уровня принимаемого сигнала на 5 км составляет 21 дБ (13 дБ), а максимальное изменение коэффициента затухания составляет 3.8 дБ/км (2.4 дБ/км). Характерно, что диапазоны изменения величин  $SPL(r_1)$  и  $\beta$  больше для волновода с мягким дном.

4) При приеме на антенну (табл. 2) уровень сигнала антенны на 5 км увеличивается на 6–7 дБ при “нырке” кита из области, близкой к поверхности моря ( $z_0 = 5$  м), в область, близкую к максимуму первой моды ( $z_0 = 15.5$  м), причем это увеличение (6–7 дБ) практически не зависит от скорости звука в дне. Коэффициент затухания сигнала антенны при таком “нырке” практически не меняется (при  $c_1 = \text{const}$ ). Таким образом, уровень сигнала антенны по сравнению с уровнем сигнала одиночного гидрофона является более устойчивым к изменению таких непредсказуемых факторов, как глубина погружения кита в момент вокализации и скорость звука в дне на трассе.

5) Несмотря на одинаковый уровень излучаемых сигналов для всех китов (160 дБ), отличия в спектрах излучаемых сигналов приводят к несколько различным уровням принимаемых сигналов при прочих равных условиях. Максимальные флуктуации уровня принимаемых сигналов наблюдаются в условиях мягкого дна и равны  $\pm 4$  дБ на расстоянии 5 км независимо от способа приема. Для жесткого дна ситуация заметно лучше при использовании антенны, а именно, флуктуации на 5 км не превышают десятых долей дБ при любой глубине китов, в то время как при одностороннем приеме флуктуации варьируются от десятых долей до единиц дБ в зависимости от глубины источника и приемника.

### 3. КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ АНАЛИЗ СПЕКТРОГРАММ

Спектрограмма сигнала определяется как модуль оконного преобразования Фурье. Для излучаемого сигнала  $p_0(t)$  имеем спектрограмму

$$S_0(\omega, t) = |\mathbf{F}[p_0(\tau)Y(\tau - t)]|, \quad (9)$$

где  $Y(\tau - t)$  – некоторая оконная функция. Для сигналов, принимаемых на одиночный гидрофон  $p(t)$  и антенну  $p_a(t)$ , соответствующие спектрограммы  $S(\omega, t)$  и  $S_a(\omega, t)$  определяются аналогично.

Ниже при расчетах спектрограмм использовалось окно Ханна с 50% перекрытием на каждом дискретном шаге скольжения по времени  $\Delta t$ . Дискретный шаг по частоте равнялся  $\Delta f = 0.5/\Delta t$ . В результате спектрограммы представляли собой матрицы значений, которые в дальнейшем сравнивались с эталонной спектрограммой  $S_E(\omega, t)$ .

В работе [5] в роли эталона выступала подбранная математическая функция, похожая на реальные спектрограммы сигналов китов. Сдвигая эталонную спектрограмму по оси времени относительно экспериментальной спектрограммы и вычисляя на каждом шаге корреляцию, делался вывод о наблюдении сигналов китов в моменты

времени максимальной корреляции спектрограмм (при превышении некоторого порогового значения).

В данной работе в роли эталона предлагается использовать спектрограмму, усредненную по реальным спектрограммам пяти китов (рис. 1). Спектрограмму шестого кита, не входящего во множество китов, из которых формируется эталон, будем сравнивать с полученным эталоном. При этом мы моделируем ситуацию распознавания незнакомого кита. Итак, сформируем эталон в виде

$$S_E(\omega, t) = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 S_{0i}(\omega, t), \quad (10)$$

где  $S_{0i}(\omega, t)$  – спектрограмма излучаемого сигнала  $i$ -го кита (здесь нумерация китов может не совпадать с нумерацией на рис. 1). Заметим, что при усреднении спектрограмм необходимо брать излучаемые сигналы одинакового уровня  $SPL_0$  (одинаковой энергии в полосе 150–1000 Гц). Из 6 исходных спектрограмм китов (рис. 1) можно сформировать 6 эталонов: в эталон 1 не входит кит 1, в эталон 2 не входит кит 2 и т.д. (рис. 4).

Рассмотрим далее процедуру сравнения с эталонами, принятую в этой статье. Для этого введем понятие коэффициента корреляции (КК), который определим сначала для двух непрерывных центрированных спектрограмм  $S_{1,2}(\omega, t)$ , где  $\iint S_{1,2}(\omega, t) d\omega dt = 0$ , как максимум двумерной корреляционной функции на плоскости частота–время:

$$B_{12} = \max \frac{\iint S_1(\omega, t) S_2(\omega - \omega', t - t') d\omega dt}{\sqrt{\iint S_1^2(\omega, t) d\omega dt} \sqrt{\iint S_2^2(\omega, t) d\omega dt}}. \quad (11)$$

Интегрирование в (11) проводится в области определения спектрограмм. Диапазон изменения КК:  $0 \leq B_{12} \leq 1$ . При переходе к дискретному аналогу интегрирование заменим суммированием, а в роли спектрограмм  $S_{1,2}$  рассмотрим эталон  $S_1 \rightarrow S_E$  и другие спектрограммы  $S_2 \rightarrow (S_0, S, S_a, S_n)$ , где  $S_n(\omega, t)$  – спектрограмма белого шума  $n(t)$  в полосе 150–1000 Гц (все спектрограммы считаем центрированными, т.е. их среднее значение равно нулю). Соответственно, полученный КК будем обозначать  $B_{12} \rightarrow (B_0, B, B_a, B_n)$ .

КК характеризует похожесть друг на друга сравниваемых спектрограмм. Чем ближе КК к единице, тем больше сходство. Если спектрограммы просто сдвинуты по времени и частоте, то они согласно (11) идентичны ( $B_{12} = 1$ ). Заметим, что в [5] корреляция между спектрограммами находилась только при временном сдвиге. В этом

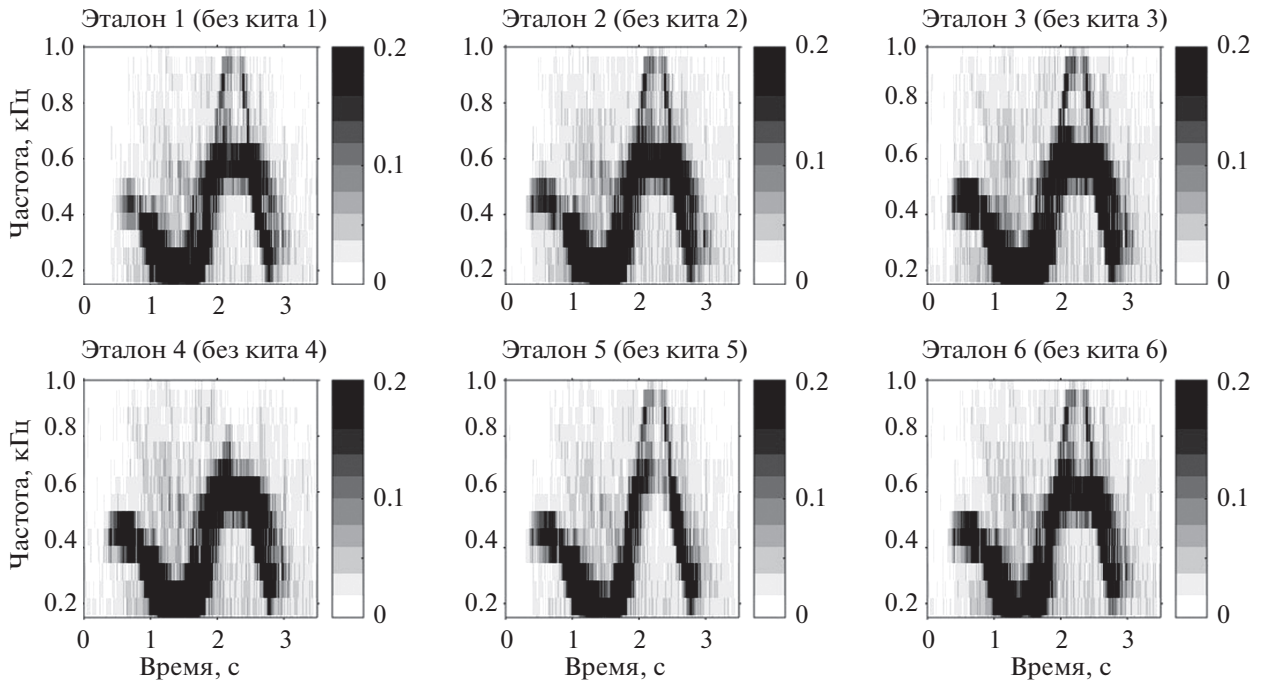


Рис. 4. Эталонные спектрограммы.

случае в формуле (11) имеем  $\omega' = 0$ , и сдвинутые по частоте спектрограммы не рассматриваются как идентичные ( $B_{12} < 1$ ).

В табл. 3 в строке  $B_0$  приведены значения КК, вычисленные при сравнении эталонов 1–6 со спектрограммами излученных сигналов китов 1–6, не входящими в эти эталоны; среднее значение  $\langle B_0 \rangle = 0.56$ . В строке  $B_n$  приведены значения КК белого шума, полученные при сравнении эталонов 1–6 с одной и той же реализацией спектрограммы шума,  $\langle B_n \rangle = 0.05$ . В строке  $B_0/B_n$  показано, во сколько раз КК излученных сигналов китов больше, чем КК белого шума (в среднем в 11 раз).

Заметим, что значения  $B_0$  в табл. 3 приведены при оптимальной дискретизации спектрограмм по времени и частоте ( $\Delta t = 0.008$  с,  $\Delta f = 62.5$  Гц), что определялось подбором. А именно, спектрограммы нужно было до определенной степени огрубить, чтобы получить максимальные значения  $B_0$ . На рис. 1 и рис. 4 изображены спектрограммы при оптимальной дискретизации.

Значения  $B_0$ , превышающие среднее значение, указывают на то, что сигнал данного кита ближе к данному эталону, и наоборот. КК, максимально близкий к среднему значению, наблюдается для пары (кит 1, эталон 1). Предполагая, что не только для излучаемых, но и для принимаемых сигналов китов на дальних расстояниях пара (кит 1, эталон 1) отражает среднее значение КК, выберем эту пару для дальнейших расчетов.

На рис. 5 приведены  $B(r)$  и  $B_a(r)$  – зависимости КК от расстояния, полученные при сравнении эталона 1 со спектрограммами сигналов кита 1, принимаемыми на одиночный гидрофон и антенну, в отсутствие и в присутствии аддитивного белого шума на приемниках. Уровень шума был выбран 70 и 80 дБ относительно 1 мкПа в полосе 1 Гц, что соответствует экспериментальным данным шума на арктическом шельфе. Из рис. 5 можно сделать следующие выводы:

1) Для мягкого дна (верхний ряд рисунков) значения КК одиночного гидрофона и антенны в отсутствие шумов (серые и черные жирные ли-

Таблица 3. КК излучаемых сигналов китов 1–6 и шума при сравнении с эталонами 1–6

	Эталон 1 кит 1	Эталон 2 кит 2	Эталон 3 кит 3	Эталон 4 кит 4	Эталон 5 кит 5	Эталон 6 кит 6
$B_0$	0.5793	0.5823	0.6724	0.4598	0.4216	0.6314
$B_n$	0.0522	0.0522	0.0527	0.0491	0.0456	0.0549
$B_0/B_n$	11.1001	11.1583	12.7465	9.3661	9.2416	11.5051



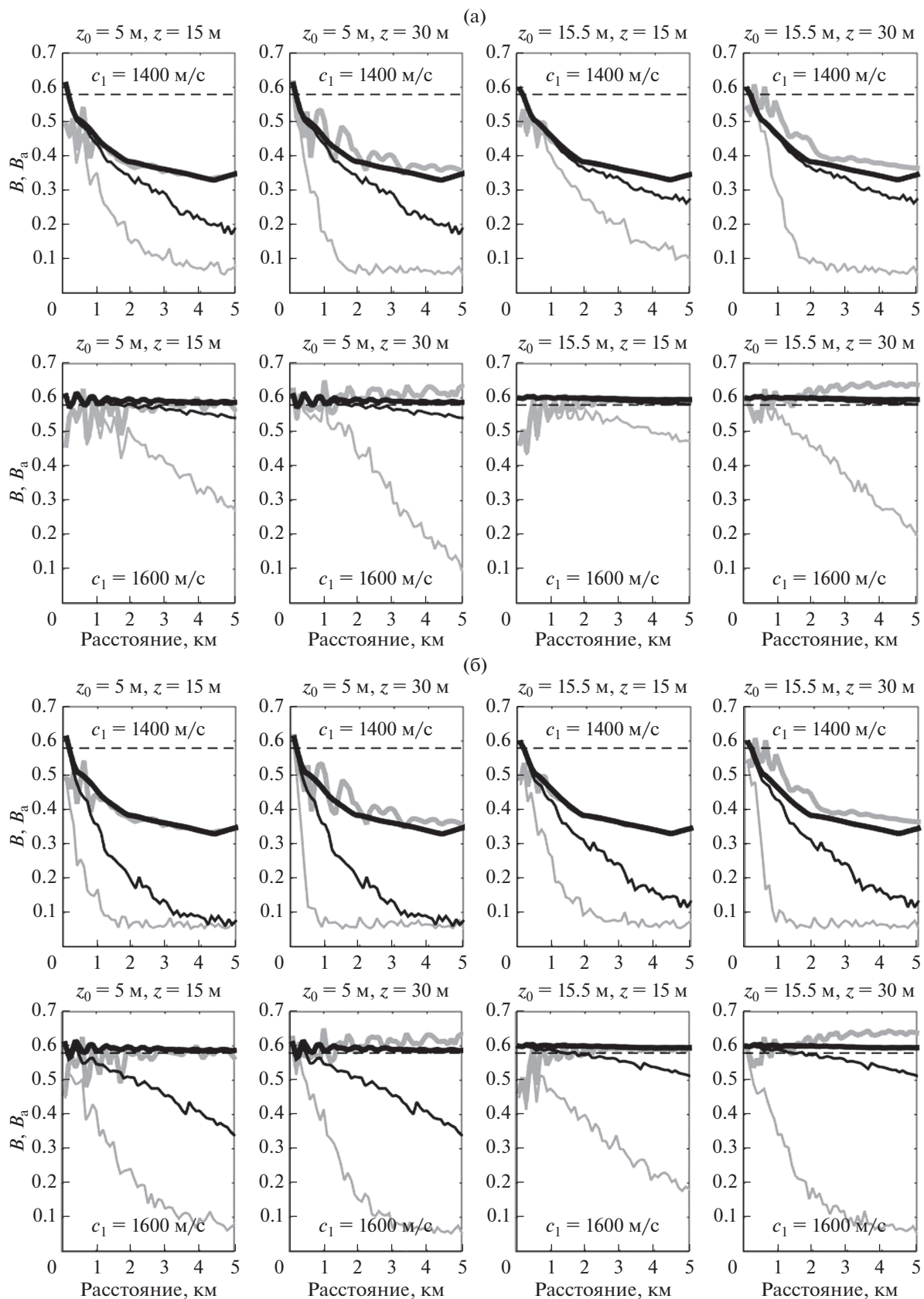


Рис. 5. КК сигнала кита 1 при приеме на одиночный гидрофон (серые линии) и антенну (черные линии), в отсутствие шумов (жирные линии) и в присутствии шумов (тонкие линии). Пунктир – КК излучаемого сигнала кита 1. Уровень излучения 160 дБ, уровень шума (а) – 70 дБ и (б) – 80 дБ.

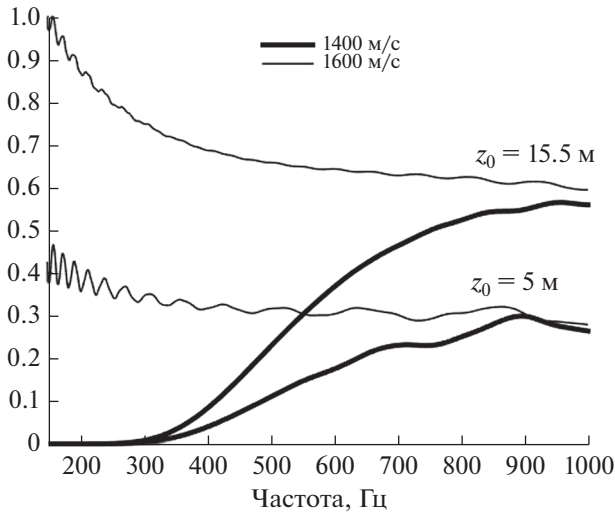


Рис. 6. Модули ПФ волновода при приеме на антенну при  $c_1 = 1400, 1600$  м/с,  $z_0 = 5, 15.5$  м, нормированные на максимальное значение.

нии) заметно уменьшаются с расстоянием, для жесткого дна (нижний ряд рисунков) — остаются практически неизменными. Объясняется это разным характером ПФ волновода для мягкого и жесткого дна (рис. 6). В рассматриваемой полосе частот для волновода с жестким дном ПФ близка к равномерной, в то время как для волновода с мягким дном ПФ существенно неравномерна. На низких частотах, где расположена основная доля энергии сигнала, ПФ для мягкого дна близка к нулю. Отсюда следует сильное искажение принимаемого сигнала по сравнению с излучаемым сигналом, что проявляется в уменьшении КК.

2) Присутствие шумов вносит искажения в принимаемый сигнал, дополнительные к искажениям, вносимым ПФ. С увеличением расстояния от источника отношение сигнал/шум уменьшается, что приводит к росту искажений и уменьшению КК. При этом использование антенны по сравнению с одиночным гидрофоном дает явный выигрыш — зависимости КК антенны (тонкие черные линии) существенно выше зависимостей КК одиночного гидрофона (тонкие серые линии), что означает большую похожесть излучаемого сигнала на сигнал антенны, чем на сигнал одиночного гидрофона.

3) В присутствии шумов зависимость значения КК от глубины погружения кита существенно более ярко выражена при приеме на одиночный гидрофон, чем при приеме на антенну. При уровне шума 70 дБ и для мягкого дна ( $c_1 = 1400$  м/с) значения КК при одиночном приеме доходят до уровня КК шума:  $B \approx B_n \approx 0.05$ . Это значит, что на данных расстояниях распознавание сигналов китов невозможно в рамках рассматриваемого метода. При уровне шума 80 дБ ситуация для мягкого дна еще более усугубляется — распознавание

при одиночном приеме возможно на совсем малых дальностях до 1 км; для жесткого дна ( $c_1 = 1600$  м/с) распознавание возможно до 5 км.

#### 4. МОДЕЛЬ С ПОВЕРХНОСТНЫМ ВОЛНЕНИЕМ

Усложним модель волновода, добавив поверхностное волнение (ПВ). Пусть  $\tilde{S}(r, \varphi)$  — реализация случайных отклонений морской поверхности от положения равновесия, где  $\varphi$  — азимутальный угол. Полагая картину поверхности неподвижной (“замороженной”) и пренебрегая горизонтальной рефракцией звука, расчет функции Грина волновода можно провести в вертикальной плоскости источник—приемник по формуле [19]

$$G(\omega, r, z, z_0) = \sum_{m=1}^{\tilde{M}} C_m(r) \frac{\psi_m(r, z)}{\sqrt{q_m(r)r}} \times \exp\left(i \int_0^r q_m(r') dr'\right). \quad (12)$$

Здесь  $\psi_m(r, z)$  и  $\xi_m(r) = q_m(r) + i\gamma_m(r)/2$  — собственные функции и собственные значения задачи Штурма—Лиувилля, рассчитываемые в каждом поперечном сечении волновода. Зависимость от  $r$  возникает из-за изменения толщины водного слоя  $H(r)$ , которая при выбранной скорости ветра 10 м/с меняется в пределах 26—34 м.

Модовые коэффициенты  $C_m(r)$  определяются при каждой фиксированной частоте звука из решения системы дифференциальных уравнений

$$\frac{dC_m}{dr} = -\frac{\gamma_m}{2} C_m + \sum_{l=1}^{\tilde{M}} d_{ml} C_l \sqrt{\frac{q_m}{q_l}} \times \exp\left(i \int_0^r (q_l - q_m) dr'\right), \quad (13)$$

$$C_m(0) = \frac{1}{\sqrt{8\pi}} \exp\left(i \frac{\pi}{4}\right) \psi_m(0, z_0),$$

$$d_{mm} = 0; \quad d_{ml}(r) = \frac{1}{2} \left( \frac{q_l}{q_m} D_{lm} - D_{ml} \right), \quad m \neq l,$$

$$D_{ml}(r) = \frac{1}{q_m^2 - q_l^2} \frac{\partial \tilde{S}}{\partial r} \left( \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \frac{\partial \psi_l}{\partial z} \right) \Bigg|_{z=\tilde{S}}.$$

Количество уравнений в (13), равное числу мод  $\tilde{M}$  в случае ПВ, выбиралось равным:  $\tilde{M} = \{2H_{\min}/\lambda\}$ , где  $H_{\min} = 26$  м — минимальная толщина водного слоя. Заметим, что  $\tilde{M} < M$  (см. (6)). Например, при  $c_1 = 1600$  м/с и частоте 150 Гц имеем  $\tilde{M} = 5, M = 6$ , а при частоте 1000 Гц имеем  $\tilde{M} = 36, M = 41$ . Однако тестирование показало, что в отсутствие ПВ вычисление функции Грина согласно (6) и (12) приводит к примерно одинаковому результату расчета величин  $SPL, SPL_a, B, B_a$

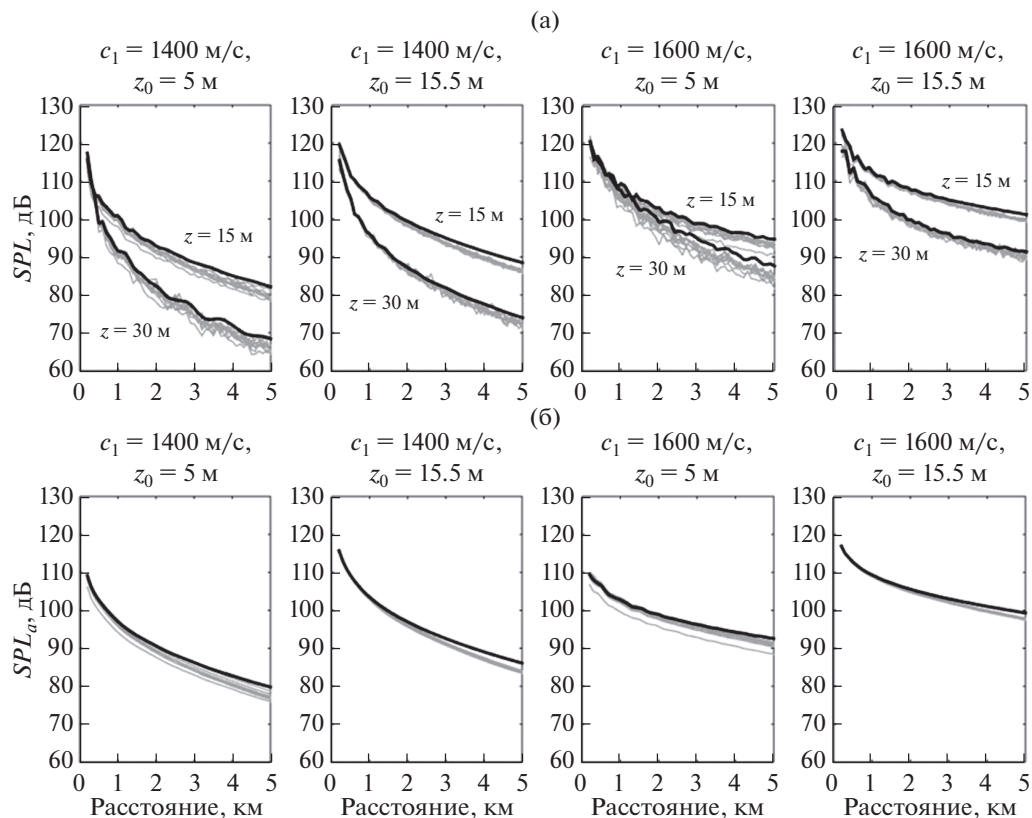


Рис. 7. (а) – Уровень принимаемого сигнала кита 1 при приеме на одиночный гидрофон и (б) – антенну, в отсутствие ПВ (черная кривая) и в присутствии ПВ (серые кривые, 10 случайных реализаций). Уровень излучаемого сигнала 160 дБ.

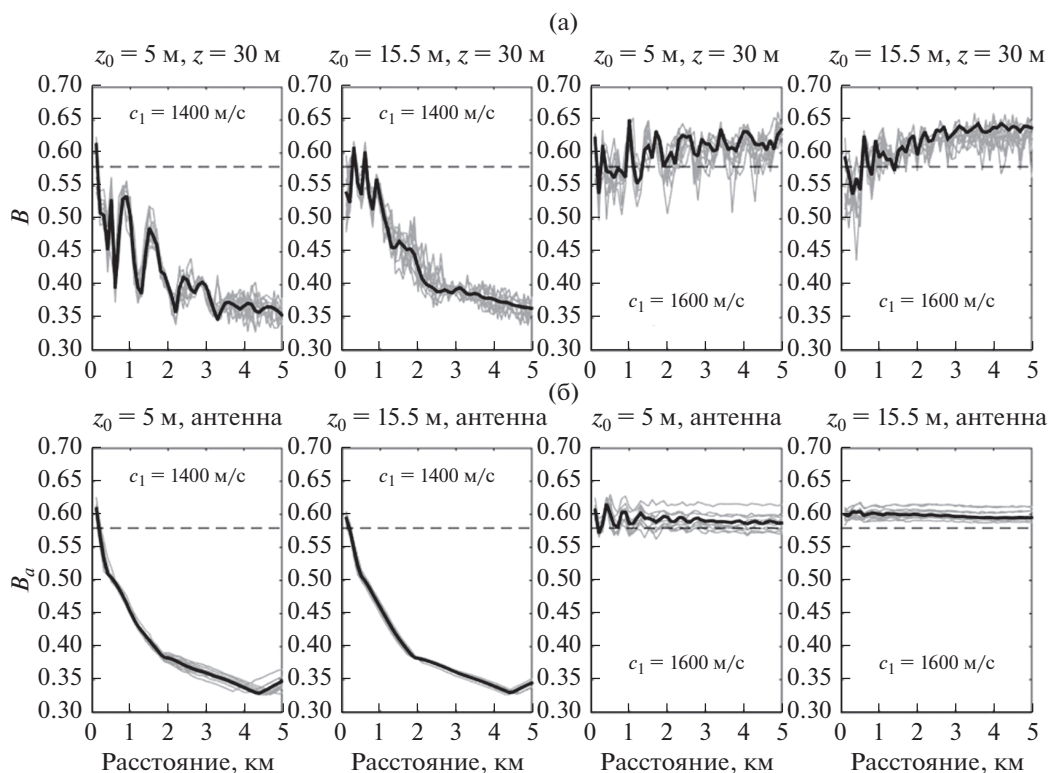


Рис. 8. (а) – КК сигнала кита 1 при приеме на одиночный гидрофон и (б) – антенну, в отсутствие ПВ (черная кривая) и в присутствии ПВ (серые кривые, 10 случайных реализаций).

при  $r \geq 200$  м. Отсюда следует, что расчеты в присутствии ПВ можно считать адекватными, начиная с указанных расстояний.

На рис. 7 и рис. 8 показаны результаты вычислений уровня принимаемого сигнала и величины КК для кита 1 в отсутствие и в присутствии ПВ. Как видно, выбранный уровень ПВ незначительно влияет на характеристики принимаемых сигналов на расстояниях до 5 км. Заметим также, что в отсутствие и в присутствии ПВ рассматриваемые зависимости при приеме на антенну более сглаженные, чем при приеме на одиночный гидрофон.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим, что прием и идентификацию сигналов гренландских китов предпочтительнее проводить с использованием вертикальной приемной антенны с выделением первой моды. Как показали расчеты, характеристики затухания и искажения сигналов, принимаемых антенной, по сравнению с аналогичными параметрами сигналов, регистрируемых одиночным приемником, более стабильны и устойчивы:

- 1) к изменениям глубины погружения кита,
- 2) к возможным в условиях Арктики значительным перепадам скорости звука в дне вдоль акустической трассы,
- 3) к воздействию аддитивных шумов.

Заметим, что в одном из экспериментов у побережья Аляски уже использовались модовые вертикальные приемные антенны для пассивной пеленгации гренландских китов [20]. По утверждению авторов определение расстояний до китов, используя модовые антенны, точнее, чем при использовании одиночных приемников. Это является еще одним аргументом в пользу применения вертикальных антенн.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-02036), программы президенту-ма РАН № 5 “Фотонные технологии в зондировании неоднородных сред и биообъектов” и государственного задания ИО РАН (тема 0149-2019-0011).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красная книга Российской Федерации (животные) / Гл. ред. Данилов–Данильян В.И. М.: Астрель, 2001.
2. George J.C., Zeh J., Suydam R., Clark C. Abundance and population trend (1978–2001) of western arctic bowhead whales surveyed near Barrow, Alaska // *Marine Mammal Science* 2004. V. 20(4). P. 755–773.
3. Cummings W.C., Holliday D.V. Sounds and source levels from bowhead whales off Pt. Barrow, Alaska // *J. Acoust. Soc. Am.* 1987. V. 82. № 3. P. 814–821.
4. Stafford K.M., Lydersen C., Wiig Ø., Kovacs K.M. Extreme diversity in the songs of Spitsbergen’s bowhead whales // *Biol. Lett.* 2018. V. 14(4). 20180056.
5. Mellinger D.K., Clark C.W. Recognizing transient low-frequency whale sounds by spectrogram correlation // *J. Acoust. Soc. Am.* 2000. V. 107. № 6. P. 3518–3529.
6. Munger L.M., Mellinger D.K., Wiggins S.M., Moore S.E., Hildebrand J.A. Performance of spectrogram cross-correlation in detecting right whale calls in long-term recordings from the Bering Sea // *Canadian Acoustics* 2005. V. 33(2). P. 25–34.
7. Mellinger D.K., Clark C.W. Methods for automatic detection of mysticete sounds // *Marine & Freshwater Behaviour & Physiology*. 1997. V. 29(1–4). P. 163–181.
8. Гриценко В.А. Метод автоматизированного поиска вокализаций серых китов // *Акустика океана. Доклады XV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских*. М.: ГЕОС, 2016.
9. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. Особенности распространения звука в мелком море с мягким дном // *Ученые записки физического факультета МГУ*. 2014. № 6. 146335.
10. Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. Затухание звука в мелководных акваториях с газонасыщенным дном // *Акуст. журн.* 2015. Т. 61. № 1. С. 90–100.
11. Григорьев В.А., Петников В.Г. О возможности представления акустического поля в мелком море в виде суммы нормальных мод и квазимод // *Акуст. журн.* 2016. Т. 62. № 6. С. 681–698.
12. Григорьев В.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Звуковое поле в мелководном волноводе арктического типа с дном, содержащим газонасыщенный осадочный слой // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 4. С. 389–405.
13. Григорьев В.А., Петников В.Г., Росляков А.Г., Терёхина Я.Е. Распространение звука в мелком море с неоднородным газонасыщенным дном // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 3. С. 342–358.
14. Волков М.В., Григорьев В.А., Жилин И.В., Луньков А.А., Петников В.Г., Шатравин А.В. Мелководный акустический волновод арктического типа как канал для передачи информации при звукоподводной связи // *Акуст. журн.* 2018. Т. 64. № 6. С. 676–681.
15. Волков М.В., Григорьев В.А., Луньков А.А., Петников В.Г. О возможности применения вертикальных приемных антенн для звукоподводной связи // *Акуст. журн.* 2019. Т. 65. № 3. С. 332–342.
16. Mellinger D.K., Clark C.W. MobySound: A reference archive for studying automatic recognition of marine mammal sounds // *Applied Acoustics*. 2006. V. 67. P. 1226–1242.
17. Луньков А.А., Петников В.Г. Влияние случайных гидродинамических неоднородностей на затухание низкочастотного звука в мелком море // *Акуст. журн.* 2010. Т. 56. № 3. С. 364–372.
18. Katsnelson B., Petnikov V., Lynch J. *Fundamentals of Shallow Water Acoustics*. New York, Dordrecht, Heidelberg, London: Springer, 2012.
19. Луньков А.А., Петников В.Г., Черноусов А.Д. Затухание звука на океаническом шельфе на небольших расстояниях от источника в присутствии поверхностного волнения // *Акуст. журн.* 2017. Т. 63. № 2. С. 180–186.
20. Abadi S.H., Thode A.M., Blackwell S.B., Dowling D.R. Ranging bowhead whale calls in a shallow-water dispersive waveguide // *J. Acoust. Soc. Am.* 2014. V. 136. № 1. P. 130–144.