

АКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ НА МЕЛКОВОДНОМ ШЕЛЬФЕ СУДАМИ С ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

© 2020 г. А. Н. Рутенко^{а, *}, М. Ю. Фершалов^а, В. Г. Ущиповский^а

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

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

Поступила в редакцию 13.02.2020 г.

После доработки 23.03.2020 г.

Принята к публикации 28.04.2020 г.

Приводятся результаты пространственных измерений акустических шумов, генерируемых судами ледового плавания дизель-электроходами, применяемыми компанией “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” для работы с нефтегазовыми платформами *ПА-Б* и *Моликпак*, установленными на северо-восточном шельфе о. Сахалин. С помощью 3D модового параболического уравнения и опорных натуральных измерений, в приближении нормальных вертикальных мод и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости, проведены расчеты антропогенных акустических полей, формируемых данными судами в прибрежном Пильтунском районе летне-осеннего нагула серых китов. Для моделирования построены спектральные функции эквивалентных судам точечных источников антропогенных акустических шумов. Результаты численного моделирования, проведенного с их помощью, согласуются с натурными измерениями.

Ключевые слова: акустические шумы, генерируемые судами на шельфе, построение эквивалентного точечного источника шума, экспериментальные и теоретические исследования распространения звука на шельфе

DOI: 10.31857/S0320791920050123

ВВЕДЕНИЕ

При освоении углеводородного *Пильтун-Астохского* месторождения, расположенного на северо-восточном шельфе о. Сахалин, компания “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” (далее “Сахалин Энерджи”) особое внимание уделяет контролю уровней антропогенных акустических шумов, генерируемых ее производственной деятельностью в данном районе. Это обусловлено тем, что их нефтегазодобывающие платформы *Моликпак* и *ПА-Б* расположены в 10 и 8 км от восточной границы прибрежного *Пильтунского* района летне-осеннего нагула западной (охотско-корейской) популяции серых китов, занесенных в *Красную книгу* РФ [1–3]. Индустриальные акустические шумы являются антропогенным фактором для серых китов, поэтому компания пытается их минимизировать с помощью проведения специальных мониторингов и предварительного численного моделирования [4–6]. В работе [7] показано, что важным источником антропогенных шумов в этом районе являются шумы судов, обеспечивающих работу платформ, причем наиболее шумным и продолжительным является режим динамического позиционирования (ДП)

судна при многочасовой работе с краном платформы.

В данной работе представлены результаты специальных натуральных измерений и численного моделирования антропогенных акустических полей, формируемых в районе нагула серых китов, новыми судами ледового плавания дизель-электроходами с двигателями *AZIPOD* [8]. “Сахалин Энерджи” с 2017–2018 гг. применяет 4 таких судна, и поэтому в 2019 г. была поставлена задача провести обмер генерируемых ими акустических шумов и построить оценки антропогенных полей, формируемых в районах нагула серых китов при проведении судами типовых операций: движение со скоростью 10 узлов возле платформ и вблизи 20-метровой изобаты – восточной границы прибрежного *Пильтунского* района нагула китов, а также во время работы с платформами в режиме ДП.

Многолетние наблюдения за распределением серых китов в этом районе [2, 3] показали, что киты кормятся на глубинах 6...15 м, и поэтому анализ результатов ежегодных акустических измерений, проводимых с помощью автономных подводных акустических регистраторов – АПАР [9, 10], уста-

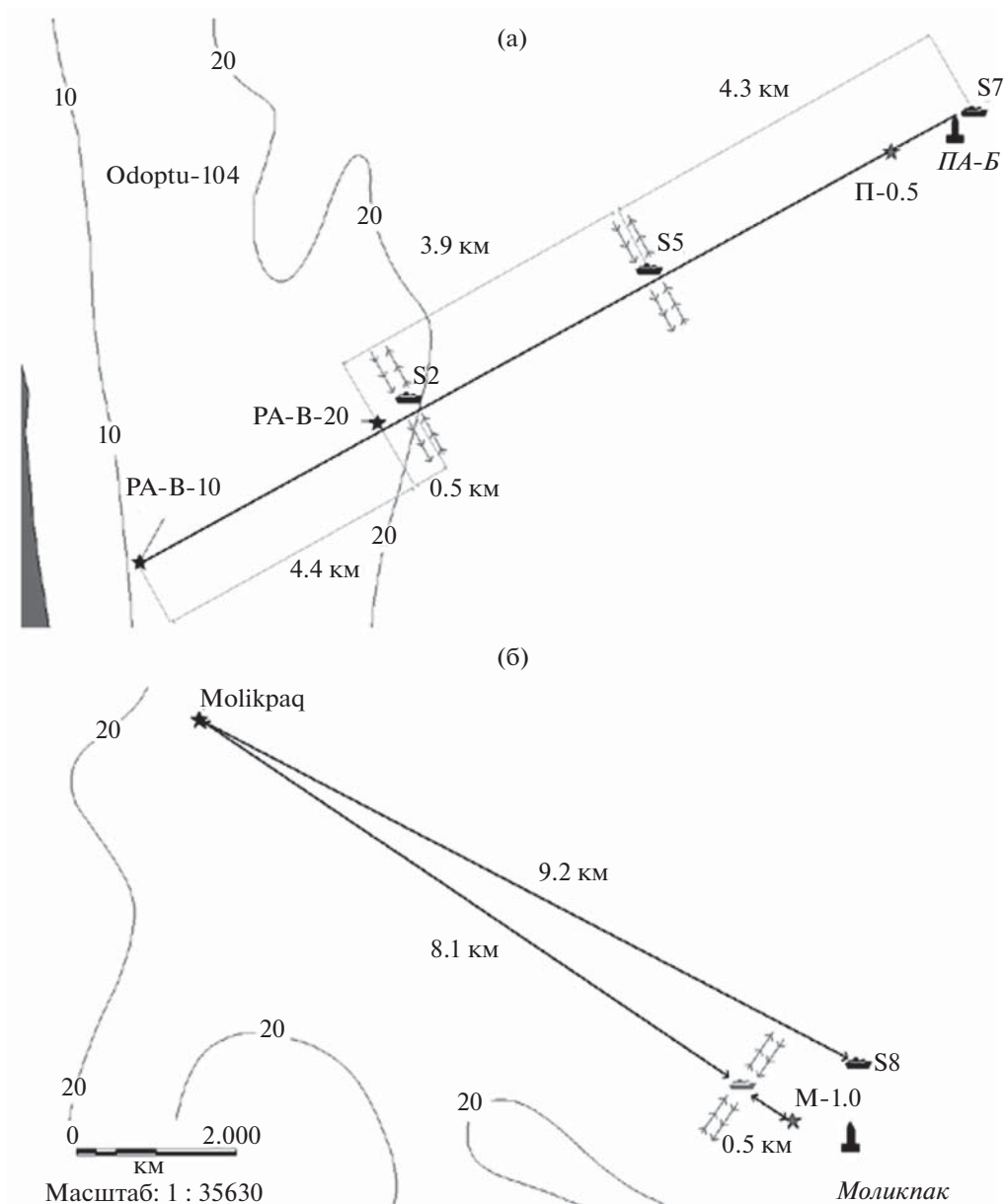


Рис. 1. Карта района с указанием точек расположения нефтегазодобывающих платформ (а) – ПА-Б (глубина моря 32 м), (б) – Моликпак (30 м), и треков, на которых проводились измерения шумов, генерируемых обмеряемыми судами, в 2013 г. (точки П-0.5, М-1.0) и в 2019 г.: S2 – 20, S5 – 25, S7 – 32, S8 – 30 м.

навливаемых в точках, показанных на рис. 1, характеризует вариации уровней фоновых и антропогенных шумов на восточной границе и внутри прибрежного *Пильтунского* района кормления серых китов

Необходимо отметить, что в данном районе шельфа Охотского моря в период 2005–2010 гг. с борта научно-исследовательских судов *Профессор Богоров* и *Академик Опарин* в комплексных биолого-акустических экспедициях, организуемых ТОИ ДВО РАН и ИБМ ДВО РАН при финансовой поддержке компаниями “Сахалин Энерджи”

и “Эксон Нефтегаз Лимитед”, проводились гидрологические и батиметрические измерения, а также специальные исследования потерь при распространении звука вдоль акустических трасс, простирающихся от места установки потенциального источника антропогенных шумов в традиционные районы кормления серых китов. Эти данные позволили построить адекватные экспериментальным данным теоретические модели, которые позволяют в пределах изученного района предсказывать уровни шумов, формируемых известными источниками с заданным расположением

[7, 11–13]. Акустические измерения, проводимые в точках мониторинга РА-В-20 и Molikpaq (см. рис. 1) показали, что уровни антропогенных шумов от механизмов и устройств, работающих на соответствующих платформах, значительно ниже, чем от обслуживающих их судов. Поэтому в 2013 г. были проведены специальные пространственные акустические измерения спектров акустических шумов, формируемых в данной акватории буксирами разного типа в режиме равномерного движения у платформы *Моликпак* и в режиме динамического позиционирования у платформы *ПА-Б* [7].

Предложена методика, основанная на применении модового параболического уравнения (МПУ) [14, 15] в приближении нормальных адиабатических вертикальных водных и воднодонных мод и узкоугольного параболического уравнения в горизонтальной плоскости, для вычисления акустического поля, формируемого эквивалентным известному (судно) точечным источником в 3D неоднородном геоакустическом волноводе, в котором известны положение источника, распределение скорости звука в воде C_w , пространственный рельеф дна – батиметрические данные, модельное распределение в дне акустических параметров слагающих дно пород. Проведены специальные натурные измерения с помощью гидрофонов акустических станций [10], установленных у дна в точках РА-В-20, РА-В-10 и Molikpaq (рис. 1), во время движения обмеряемых судов по соответствующим маршрутам, включая имитацию работы с платформами в точках: S2, S7 и S8. В этих точках суда работали в режиме ДП. Точка S2 удалена от точки акустического мониторинга РА-В-20 на 500 м, и, поскольку она лежит на акустической трассе “S7–П-05–S5–S2–РА-В-20–РА-В-10”, то логично построить эквивалентные точечные функции источника для режима ДП и движения со скоростью 10 узлов по акустическим сигналам, записанным у дна в точке РА-В-20 и соответствующим работе судна в точке S2. Построение осуществляется с помощью МПУ по методике, представленной в работах [16, 17].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

В августе 2019 г. три однотипных судна компании “Сахалин Энерджи”: *Геннадий Невельской*, *Евгений Примаков* и *Федор Ушаков* прошли процедуру обмера генерируемых ими акустических шумов при движении со скоростью 10 узлов возле платформ и вблизи 20-метровой изобаты – восточной границы прибрежного *Пильтунского* района нагула серых китов. Ниже приведена методика проведения таких измерений.

Стационарные измерения у дна вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц проводятся с помощью гидрофона типа

Ги-50, установленного на резиновых амортизаторах в пирамидке, изготовленной из стального прутка. В 2013 г. в точках ежегодного акустического мониторинга измерения проводились с помощью АПАР [9], а возле платформ (см. рис. 1, точки П-0.5 и М-1.0) – с помощью мини-АПАР, отличающегося от АПАР только временем автономной работы – 6 сут, в то время как у АПАР автономность 52 сут. В 2019 г. акустические измерения проводились только новыми АПАР с динамическим диапазоном измерения вариаций акустического давления, равным 145 дБ [10].

Гидрологические измерения, включая измерения скорости звука в воде, были проведены с помощью автономного комбинированного зонда – MIDAS CTD +500 производства компании Valeport Limited, Англия. При построении модельных геоакустических волноводов, соответствующих трассам распространения звука, использовались батиметрические данные из базы данных ТОИ ДВО РАН и распределение акустических параметров пород, слагающих дно, полученные в результате специальных натурных и теоретических исследований.

Поясним методику построения эквивалентных точечных функций источников, с помощью которых рассчитываются пространственные распределения антропогенных акустических полей, формируемых в прибрежном *Пильтунском* районе нагула серых китов известным источником – судном, работающим в заданном режиме.

В данном случае комплексный спектр эквивалентной точечной функции источника (судно в точке S2) рассчитывается для акустического сигнала $p_r(t)$, измеренного в точке РА-В-20. Для этого его комплексный спектр $\hat{S}_r(f)$ подставляется в точку источника и с помощью МПУ проводится моделирование распространения в заданном 3D модельном волноводе на всех частотах в диапазоне Δf , с последующей коррекцией значений комплексного спектра источника, так чтобы в опорной точке модельный спектр $\hat{S}_{model}(f)$ совпал с измеренным $\hat{S}_r(f)$. После этого мы называем соответствующий комплексный спектр $S_{source} = \hat{S}_{z=s,x=0,y=0}(f)$ эквивалентной функцией источника, которая позволяет с помощью МПУ и модельного геоакустического волновода корректно рассчитывать акустическое поле, формируемое данным источником в акватории, ограниченной раскрытом узкоугольного параболического уравнения (26°). Корректность моделирования проверяется сравнением результатов моделирования с результатами синхронных натурных измерений, проведенных в точке РА-В-10. Эквивалентные точечные функции источников для всех судов были построены с помощью МПУ и модельного 3D волновода, построенного для акустического профиля S2–РА-В-20–РА-В-10.

В точке РА-В-10 проводилось контрольное сравнение измеренных и модельных данных.

Измеренный или смоделированный акустический сигнал характеризуется во временной области вариациями акустического давления $p(t)$, по которым с помощью преобразования Фурье можно рассчитать комплексный спектр $\hat{S}(f)$, из которого можно с помощью обратного преобразования Фурье, ограничившись частотным диапазоном Δf , вернуться во временную область к вариациям $\tilde{p}(t)$. Это преобразование мы используем при построении эквивалентной точечной функции источника импульсного или широкополосного непрерывного акустического сигнала. Кроме того, с помощью преобразования Фурье рассчитывается периодограмма $G(f)$, характеризующая значения спектральной плотности мощности в 1 Гц диапазонах. Для удобства сравнения абсолютных значений широкополосных и тональных сигналов преобразование Фурье осуществляется по реализации $p(t)$, равной 1 секунде. Полагая, что вариации $p(t)$ в исследуемом частотном диапазоне Δf на оцениваемом временном интервале Δt являются стационарными, проводится усреднение значений $G(f)$, рассчитанных по последовательным 1-секундным реализациям. Таким образом, мы получаем оценку спектра $\hat{G}(f)$ измеренных на временном интервале Δt вариаций акустического давления $p(t)$. При проведении натурных измерений мы можем проводить усреднение по реализациям и за счет перемещения источника – судна, такое усреднение сглаживает интерференционную структуру формируемого судном акустического поля, хотя точка измерения $p(t)$ стационарна. При численном моделировании сглаживание пространственной интерференционной структуры акустического поля осуществляется с помощью усреднения рассчитанных значений по пространственной сетке, включающей точку, в которой были проведены натурные измерения.

Таким образом, наглядной количественной физической характеристикой антропогенного акустического поля в заданной точке акватории является оценка модуля спектра $\hat{G}(f)$, которая в децибелах иллюстрирует значение спектральной плотности мощности акустических шумов на данной частоте – $\hat{G}(f) = 10 \lg \left(\frac{\hat{G}(f)}{p_0^2} \right)$, где $p_0 = 1$ мкПа, но можно охарактеризовать уровень антропогенных шумов и одним интегральным значением,

это уровень среднеквадратичного значения акустического шума в частотном диапазоне Δf :

$$SPL_{rms}(\Delta f) = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \hat{G}(f) df}}{p_0} \right), \text{ дБ отн. } 1 \text{ мкПа};$$

$$SEL(\Delta f) = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} \hat{G}(f) df}{p_0^2 t_0} \right), \text{ дБ отн. } 1 \text{ мкПа}^2 \text{ с}.$$

Вторая формула определяет значение уровня экспозиции или воздействия антропогенных шумов на водную среду. В этих формулах Δt – временной интервал, на котором проведены расчеты периодограмм по последовательным 1-секундным реализациям $p(t)$, $p_0 = 1$ мкПа, $t_0 = 1$ с. Следует отметить, что построение оценок этих параметров в частотной области позволяет исключить влияние низкочастотных псевдошумов обтекания и вибраций, вызываемых на мелководном шельфе приливными течениями и орбитальным движением частиц воды в длинных поверхностных волнах зыби и во время штормов. Кроме того, можно исключить и фоновые шумы с частотами, например, больше 2 кГц для прохода судна со скоростью 10 узлов и больше 1 кГц для работы судна в режиме ДП. Поскольку, согласно представленным ранее спектрам типовых шумов, генерируемых судами, энергия акустических волн на этих частотах не существенна по сравнению с энергией в указанных диапазонах, при расчете этих параметров мы ограничимся диапазоном $\Delta f = f_2 - f_1$, где $f_1 = 10$ Гц, а $f_2 = 2000$ Гц для движения судна со скоростью 10 узлов и $f_2 = 1000$ Гц для режима ДП. Например, для режима ДП в точке РА-В-20 значения $SEL(10-15000 \text{ Гц}) = 126.9$ дБ, а $SEL(10-1000 \text{ Гц}) = 125.1$ дБ, меньше на 1.8 дБ.

В заключение отметим, что если параметры $SPL_{rms}(\Delta f)$ и $SEL(\Delta f)$ оценивать по одной 1-секундной реализации, то их значения в дБ эквивалентны, т.е.

$$SEL(\Delta f) = 10 \lg \left(\frac{\Delta t \int_{f_1}^{f_2} \hat{G}(f) df}{p_0^2 t_0} \right) \equiv \\ \equiv SPL_{rms}(\Delta f) = 20 \lg \left(\frac{\sqrt{\int_{f_1}^{f_2} \hat{G}(f) df}}{p_0} \right),$$

поскольку $\Delta t = 1$ с.

Проиллюстрируем методику построения S_{source} с помощью МПУ на примере акустических данных, записанных в точке РА-В-20, при работе

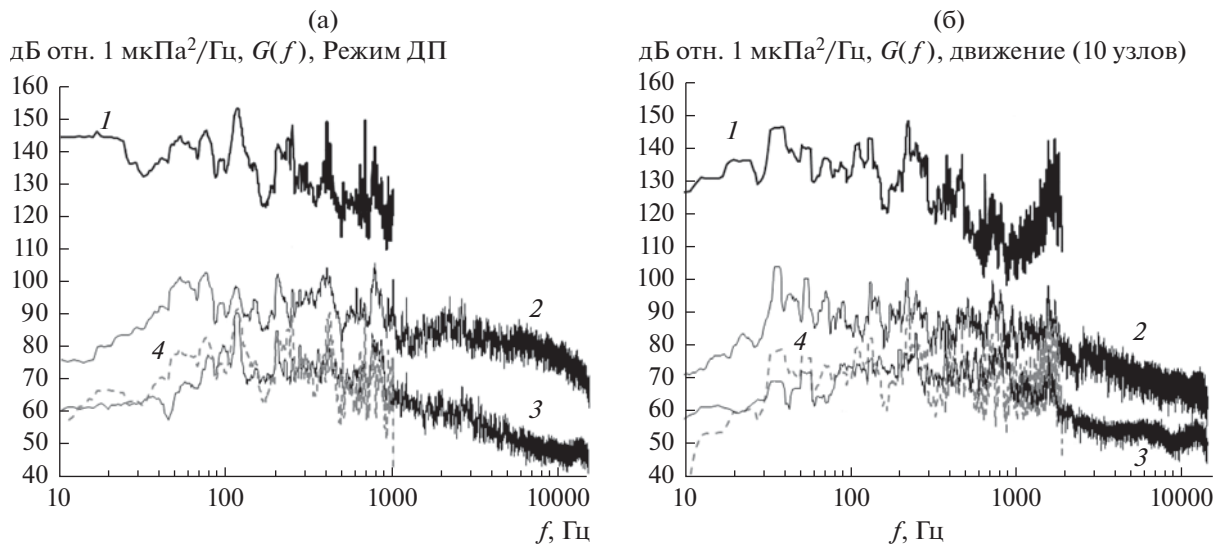


Рис. 2. Спектр акустического сигнала, измеренного в точке РА-В-20 – 2, спектр функции эквивалентного точечного источника – 1, спектр сигнала, измеренного в точке РА-В-10 – 3 и спектр антропогенных шумов, рассчитанный с помощью МПУ с использованием S_{source} – 4.

судна *Евгений Примаков* в точке S2 (см. рис. 1) в режиме ДП. По акустическим измерениям, проведенным у дна в точке РА-В-20, удаленной от S2 на 500 м, с помощью МПУ строится функция источника, а проверка корректности моделирования проводится сравнением модельных и экспериментальных данных в точке РА-В-10 (см. рис. 2). Расстояние между S2 и РА-В-10 равно 4 км. В результате выполненных расчетов в точке РА-В-10 в режиме ДП модельное значение превышает экспериментальное на 2.4 дБ, а в режиме движения на 1.1 дБ.

В 2017 г. компания *LUODE Consulting* в Финском заливе в море глубиной 60 м [18] провела специальные обмеры акустических шумов, генерируемых судном *Геннадий Невельской*. Натурные измерения были выполнены с помощью вертикальной цепочки из трех гидрофонов, расположенных на расстоянии 3, 18 и 33 м от дна, при этом запись акустических данных осуществлялась на автономные акустические регистраторы с частотой дискретизации 192 кГц. Методика проведения измерений и обработки полученных данных соответствовала стандарту NR 614 DT R00 E [19]. Значения уровня звукового давления SPL вычислялись посредством усреднения интенсивностей по трем гидрофонам за интервал времени, в течение которого судно проходило расстояние, равное его длине. Сравним представленные в этом документе [18] значения уровня звукового давления, пересчитанного на дистанцию 1 м от акустического центра судна SPL [дБ, отн. 1 мкПа/м], со значениями SPL_{rms} для судна *Евгений Примаков*, полученными по нашей методике из спектраль-

ной функции эквивалентного точечного источника, для режима движения судна со скоростью 10 узлов.

Результаты измерений и расчетов для судна *Евгений Примаков*, имеющего тот же класс, что и судно *Геннадий Невельской*, приведены на рис. 3. На этом рисунке видно, что для оценки антропогенных шумов, формируемых на границе прибрежного *Пилтунского* района кормления серых китов новыми судами, движущимися со скоростью 10 узлов вблизи (500 м) 20-метровой изобаты, можно ограничиться частотным диапазоном 10–2000 Гц, поскольку в точке РА-В-20 значение $SPL_{rms}(10–15000 \text{ Гц}) = 122.6 \text{ дБ}$, а $SPL_{rms}(10–2000 \text{ Гц}) = 122.1 \text{ дБ}$. График спектра, соответствующий эквивалентной точечной функции источника, показан на рис. 3. Этот спектр, пересчитанный с помощью МПУ в приближении нашего 3D геоакустического волновода на расстояние 1 м, дает значение $SPL_{rms}(10–2000 \text{ Гц}; z = 7 \text{ м}, y = 0, x = 1 \text{ м}) = 160.2 \text{ дБ}$ отн. 1 мкПа, а согласно работе [18] пересчет шумов, формируемых судном *Геннадий Невельской* при движении со скоростью 10 узлов на дистанции 208 м от точки акустических измерений в море глубиной 60 м, дает на расстоянии 1 м от его акустического центра значение $SPL_{rms} = 161.2 \text{ дБ}$. Таким образом, наши измерения хорошо согласуются с результатами измерений, проведенными в более глубоком море и представленными в работе [18].

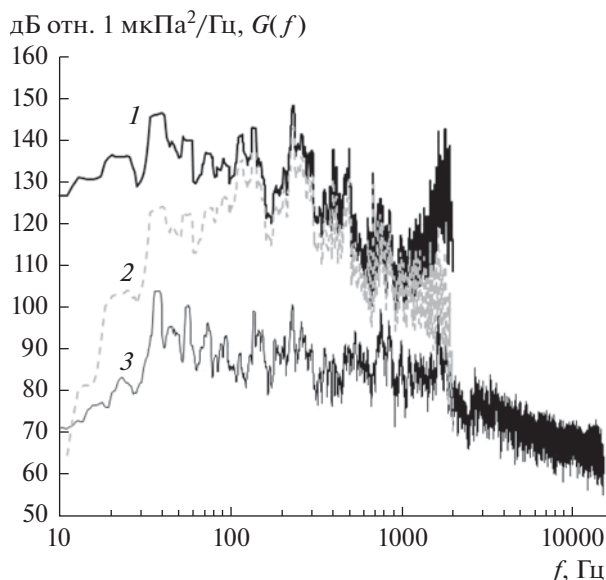


Рис. 3. График 1 – спектр функции эквивалентного точечного источника, рассчитанный с помощью МПУ по акустическому сигналу, измеренному в точке РА-В-20. График 3 – его спектр. График 2 – спектр функции эквивалентного точечного источника, пересчитанный с помощью МПУ на расстояние 1 м.

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ БУКСИРАМИ РАЗНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ И ДВИЖЕНИЯ

В работе [7] было показано, что уровень шумов, генерируемых судном в режиме ДП, значительно выше, чем когда судно равномерно движется. Поскольку суда продолжительное время работают с платформами именно в этом режиме, то представляют особый интерес натурные акустические измерения шумов, генерируемых судами во время работы с платформами *ПА-Б* и *Мо-ликнак*. На рис. 1 показаны точки S7 и S8, которые расположены вблизи этих платформ. В 2019 г. обмеряемые суда в этих точках продолжительное время работали в режиме ДП, удерживаясь в точке с помощью 2-х кормовых и 2-х носовых винтов. Кроме того, для построения эквивалентных режиму ДП точечных функций источников суда работали в этом режиме в точке S2 (см. рис. 1) и использовался акустический сигнал, измеренный у дна в точке РА-В-20. Проверка моделирования осуществлялась путем сравнения модельных значений $SEL(\Delta f)$ с измеренными. Например, для акустической трассы “S7–П-0.5–S2–РА-В-20–РА-В-10” такими точками являются РА-В-20 и РА-В-10. В 2013 г. акустические измерения проводились еще и в точке П-0.5, а обмеряемые суда действительно работали с платформой ПА-Б.

На рис. 4 приведены графики спектров акустических шумов, измеренных у дна на расстоянии

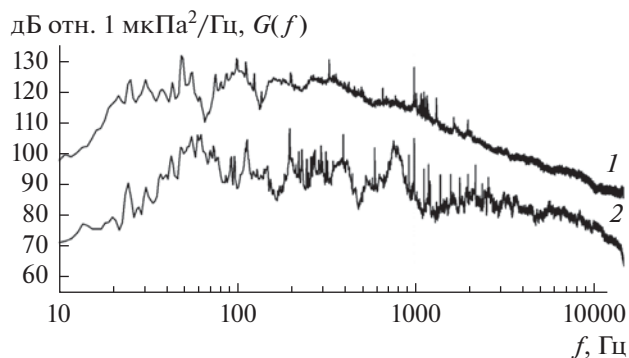


Рис. 4. График 1 – спектр акустических шумов, генерируемых буксиром *Smit Sakhalin* при работе с платформой ПА-Б в режиме ДП, измерения проведены в 2013 г. на расстоянии 550 м от судна в точке Р-0.5, показанной на рис. 1. График 2 – спектр шумов, генерируемых в точке S2 судном *Евгений Примаков* и измеренных в точке РА-В-20.

примерно 500 м от судна. График 1 соответствует антропогенным шумам, генерируемым буксиром *Smit Sakhalin* при работе с платформой ПА-Б в режиме ДП. Измерения были проведены в 2013 г. на расстоянии 500 м от судна в точке Р-0.5, показанной на рис. 1. График 2 – спектр шумов, генерируемых в точке S2 (см. рис. 1) судном *Евгений Примаков*, работающим в режиме ДП. Измерения были проведены в 2019 г. в точке РА-В-20 на расстоянии примерно 500 м от судна.

Для сравнения приведем соответствующие значения SPL_{rms} , рассчитанные в двух частотных диапазонах 10–15000 и 10–2000 Гц. График 1 – $SPL_{rms} = 151.1$ и 151.0 дБ отн 1 мкПа. График 2 – 129 и 127 дБ отн 1 мкПа. Таким образом, уровни акустических шумов, формируемых в акватории с глубиной моря 20–30 м дизель-электроходами ледового плавания типа *Евгений Примаков* в режиме динамического позиционирования на 23 дБ меньше, чем от буксиров типа *Smit Sakhalin*.

График оценки спектра антропогенных шумов, формируемых в прибрежном районе судном *Евгений Примаков*, движущимся со скоростью 10 узлов вблизи 20-метровой изобаты в точке S2, представлен на рис. 5 – график 3. Графики 1 и 2 соответствуют спектрам акустических шумов, измеренных в 2013 г. в точке М-1.0 во время движения буксиров *Smit Sakhalin* и *Pacific Endurance* со скоростью 10 узлов на расстоянии 500 м, как это показано на рис. 1. На этом рисунке видно, что обычный буксир *Smit Sakhalin* при движении генерирует низкочастотные широкополосные шумы, которые в диапазоне частот 30–120 Гц по уровню превышают шумы от дизель-электроходов более чем на 20 дБ.

Сравнительный анализ этих измерений показал, что значения уровней SPL_{rms} , рассчитанных в

двух частотных диапазонах 10–15000 и 10–2000 Гц, соответственно равны М-1.0: 135.1 и 135 дБ отн 1 мкПа; РА-В-20: 127 и 127 дБ отн 1 мкПа. Поскольку станции распространения шумов до точки М-1.0 и РА-В-20 примерно равны, то, по-видимому, судно *Евгений Примаков* при таком движении генерирует антропогенные шумы на 7.5 дБ ниже, чем буксир *Smit Sakhalin*. На этом рисунке видно, что широкополосные шумы, генерируемые буксиром, в среднем на 10 дБ выше шумов, генерируемых дизель-электроходом, но следует отметить, что узкополосные шумы с частотами 270, 800 и 1700 Гц на 10–15 дБ превышают шумы буксира.

В спектре шумов, генерируемых буксиром с электродвигателями *Pacific Endurance*, в диапазоне частот 180–300 Гц ярко выражены тональные узкополосные сигналы, которые превышают широкополосные шумы от буксира *Smit Sakhalin*, и их нет в шумовом спектре судна *Евгений Примаков*. В спектре шумов судна *Евгений Примаков* (график 3) практически отсутствуют шумы на частотах меньше 30 Гц, но в отличие от спектра *Pacific Endurance* (график 2) в нем ярко выражены узкополосные квазитональные шумы на частотах 800 и 1800 Гц.

Таким образом, график спектра шумов, генерируемых дизель-электроходами типа *Pacific Endurance*, существенно отличается от соответствующих графиков для судов ледового плавания с электро-двигателями типа *AZIPOD*, расположенными в гондолах [8]. Спектры широкополосных антропогенных шумов, генерируемых судном *Евгением Примаковым* и буксиром *Pacific Endurance*, движущимися со скоростью 10 узлов, подобны в частотном диапазоне 20–1600 Гц, но следует отметить существенные отличия по частоте для генерируемых этими судами узкополосных квазитональных шумов. В спектре шумов, генерируемых дизель-электроходами ледового плавания, нет тональных сигналов в диапазоне 60–300 Гц, но у судна *Евгений Примаков* ярко выражены два пика спектральной плотности мощности на частотах 800 и 1700 Гц, которые по уровню превышают шумы от буксира *Smit Sakhalin*.

Столь существенные различия в уровнях антропогенных шумов, генерируемых рассмотренными судами, объясняются следующим. В четырех новых судах ледового плавания компании “Сахалин Энерджи” применяются электро-двигатели, основанные на винторулевой колонке типа *AZIPOD* – Azimuthing electric Podded Drive, или азимутальный электрический капсульный привод, показанный на рис. 6а [8]. На рисунке видно, что приводной двигатель, который крутит винт, установлен в гондоле, которая вместе с двигателем может вращаться вокруг оси на 360 градусов. И в зависимости от того, куда на данный момент повернута гондола, судно и начнет движение.

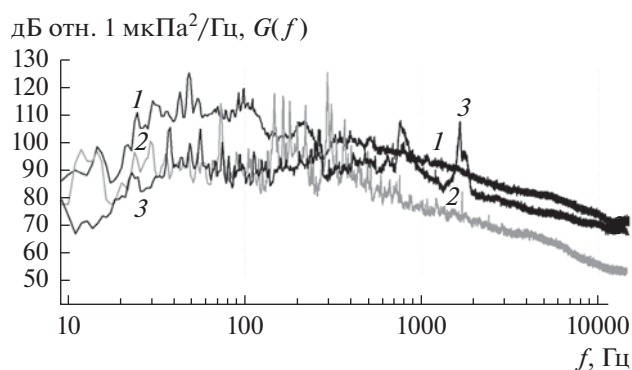


Рис. 5. Графики спектров акустических шумов, измеренных у дна при движении судов со скоростью 10 узлов на расстоянии 500 м от точки измерений. График 1 (*Smit Sakhalin*) и график 2 (*Pacific Endurance*) соответствуют антропогенным шумам, формируемым буксирами в точке М-1.0 во время их движения со скоростью 10 узлов на удалении 500 м согласно схеме, представленной на рис. 1. График 3 соответствует спектру акустических шумов, измеренных в точке мониторинга РА-В-20 во время движения судна *Евгений Примаков* в точке S2 (см. рис. 1) со скоростью 10 узлов.

Обычный судовой руль ограничен в перекалке “лево–право” углом в 35 градусов на каждый борт, *AZIPOD* не имеет таких ограничений, поэтому маневры можно совершать в более широком диапазоне. Поскольку для создания крутящего момента гребных винтов в *AZIPOD* используется электрическая тяга, то суда, на которые он устанавливается, можно отнести к дизель-электроходам. На рис. 6б видно, что обычный двигатель вращает гребной винт длинным валом, имеющим множество контактов с корпусом и дном судна. В этих точках вибрации вала и дизельного мотора (судовая машина) передаются днищу судна, которое благодаря своим геометрическим размерам и заглублению (более 5 м) эффективно возбуждает в водном слое акустические волны, которые и формируют антропогенные шумы. Вибрации, генерируемые гондолой двигателя *AZIPOD*, существенно меньше, поскольку винт вращает электродвигатель с коротким валом и, как видно на рис. 6б, *AZIPOD* тянет, а не толкает.

Движение буксира *Pacific Endurance* обеспечивают два гребных винта, вращающиеся двумя электродвигателями мощностью 7000 кВт каждый, и две винторулевые колонки с 4-х лопастными винтами, а движение буксира *Smit Sakhalin* обеспечивают 4 двигателя мощностью 2739 кВт каждый и два 4-х лопастных винта с регулируемым шагом. Необходимая для движения электроэнергия генерируется на борту *Pacific Endurance* с помощью 4 двигателей мощностью 4320 кВт каждый.

Графики спектров акустических шумов, синхронно измеренных на 20- и 10-метровых изоба-

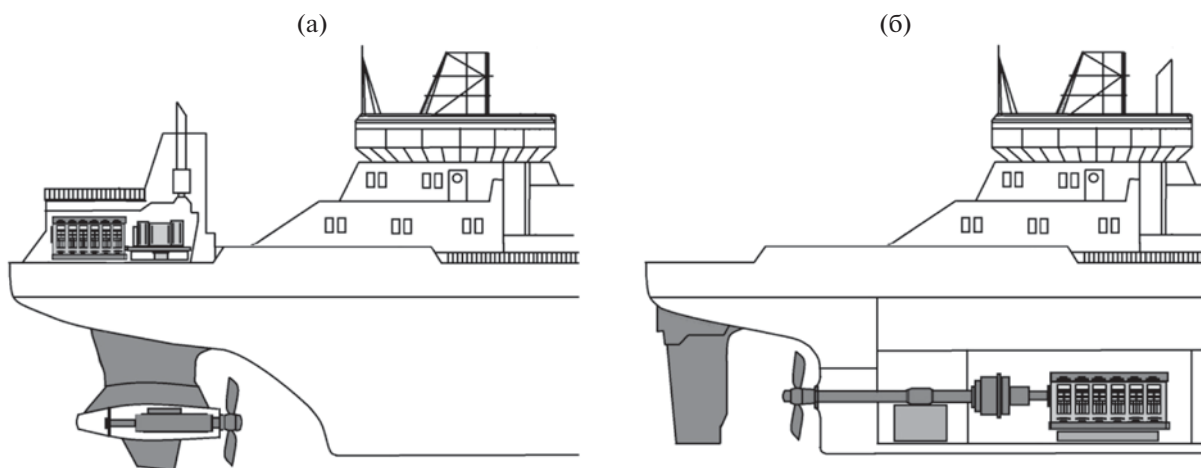


Рис. 6. На данном рисунке показано, чем отличается дизель-электроход от обычного судна: (а) — схема судна с азимутальным электрическим капсульным приводом *AZIPOD*, на которой видно, что *AZIPOD* тянет, а не толкает [8]; (б) — схема обычного судна с дизельным двигателем, вращающим гребной винт через длинный вал, имеющий множество контактов с корпусом и дном судна.

тах во время работы судна *Евгений Примаков* в режиме ДП возле платформы ПА-Б в точке S7 (см. рис. 1), представлены на рис. 7.

Измерения, проведенные в 2013 и в 2019 гг. показывают, что новые суда дизель-электроходы, оснащенные движетельной системой *AZIPOD*, во всех режимах генерируют самые низкие уровни антропогенных шумов и, согласно рис. 7, не оказывают существенного влияния на прибрежный *Пильтунский* район кормления серых китов.

АКУСТИЧЕСКИЕ ШУМЫ, ФОРМИРУЕМЫЕ СУДАМИ В ПИЛЬТУНСКОМ РАЙОНЕ КОРМЛЕНИЯ СЕРЫХ КИТОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ СО СКОРОСТЬЮ 10 УЗЛОВ

Рассмотрим спектры акустических шумов, измеренных у дна в точке акустического монито-

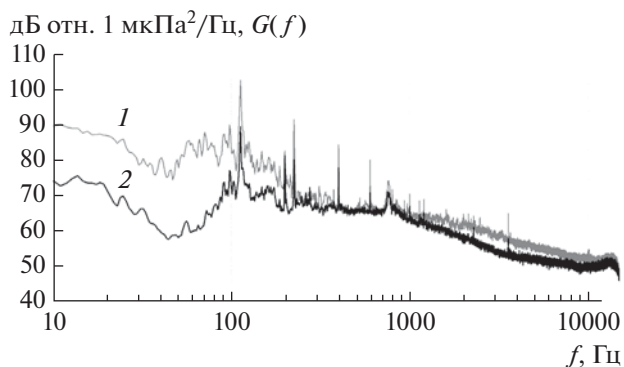


Рис. 7. Графики спектров акустических шумов, синхронно измеренных в точках РА-В-20 — кривая 1 и РА-В-10 — кривая 2 во время работы судна *Евгений Примаков* в точке S7 (см. рис. 1) в режиме ДП.

ринга, расположенной на восточной границе прибрежного *Пильтунского* района кормления серых китов РА-В-20 и внутри района на 10-метровой изобате в точке РА-В-10. На рис. 8 для сравнения приведен график 1 — спектр акустических шумов, измеренных в 2013 г. в точке М-1 (см. рис. 1) во время движения буксира *Smit Sakhalin* со скоростью 10 узлов в 500 м от этой точки. Графики 2 и 3 на этом рисунке соответствуют спектрам акустических шумов, синхронно измеренных в точках РА-В-20 и РА-В-10 во время движения дизель-электрохода *Евгений Примаков* со скоростью 10 узлов в точке S2. Расстояние от М-1 до буксира *Smit Sakhalin* на траверзе было равно 500 м. Оно равно расстоянию между точками S2 и РА-В-20. Следовательно, уровень антропогенных широкополосных шумов на частотах меньше 200 Гц на 20–30 дБ меньше у дизель-электрохода *Евгений Примаков*, на более высоких частотах их уровень меньше примерно на 10 дБ, но уровень узкополосных шумов, генерируемых судном *Евгений Примаков* с частотами 800 и 1700 Гц на 10–15 дБ превышает уровень широкополосных шумов, генерируемых буксиром *Smit Sakhalin*.

При распространении от 20-метровой изобаты до 10-метровой (см. рис. 1 и графики 2 и 3 на рис. 8) антропогенные шумы затухают на 30 дБ в частотном диапазоне 30–70 Гц и на 20 дБ в диапазоне 200–10000 Гц

На рис. 9 показаны спектры шумов, измеренных у дна в точке РА-В-20 во время прохода судном *Федор Ушаков* точки S2 со скоростью 10 узлов левым и правым бортом по отношению к точке РА-В-20. На рисунке видно, что графики спектров сливаются, но уровни тональных сигналов

отличаются, что, по-видимому, обусловлено пространственной интерференцией.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Важной задачей данной работы является построение корректных оценок уровней антропогенных акустических шумов, формируемых новыми судами компании «Сахалин Энерджи» в *Пильтунском* прибрежном районе кормления серых китов во время проведения типовых операций, связанных с обеспечением работы платформ *ПА-Б* и *Моликпак*, а также во время движения судов по согласованным маршрутам вблизи 20-метровой изобаты.

При построении спектра точечного источника, формирующего на шельфе антропогенное акустическое поле, эквивалентное полю от движущегося судна, применялась модифицированная методика, представленная в работах [20, 21]. Наша задача сложнее, поскольку надо построить эквивалентный точечный источник для судна, длина которого более чем в два раза больше глубины моря, и конечной целью являлось не получение его эквивалентного шумового спектра, а корректная оценка спектров антропогенных шумов, формируемых данным судном в неоднородном волноводе на дистанциях более 6 км.

Наша методика основана на измерениях акустических шумов от судна, движущегося по треку, перпендикулярно пересекающему акустическую трассу, на которой в двух точках проводятся у дна стационарные измерения вариаций акустического давления. При этом первая точка акустических измерений удалена от трека движения судна на 4–5 длин корпуса судна, а вторая расположена в районе, где требуются оценки антропогенных шумов от этого судна. На рис. 1 это трасса *S7–РА-В-10*.

В данной работе решена экспериментально-теоретическая задача – построены спектры точечных источников, эквивалентных шумам, генерируемым в данной акватории вспомогательными судами, работающими с платформами *ПА-Б* и *Моликпак*, для корректного оценивания уровней антропогенных шумов, формируемых ими в *Пильтунском* районе нагула серых китов.

Для ее решения на основе предварительных экспериментально-теоретических исследований необходимо построить 3D модельный геоакустический волновод, и тогда пересчет спектра эквивалентного точечного источника в любую точку данного модельного геоакустического волновода не представит сложности. Данная методика была впервые успешно применена в работе [7].

В соответствии с поставленной задачей, опираясь на натурные измерения, с помощью программы на основе МПУ в приближении модель-

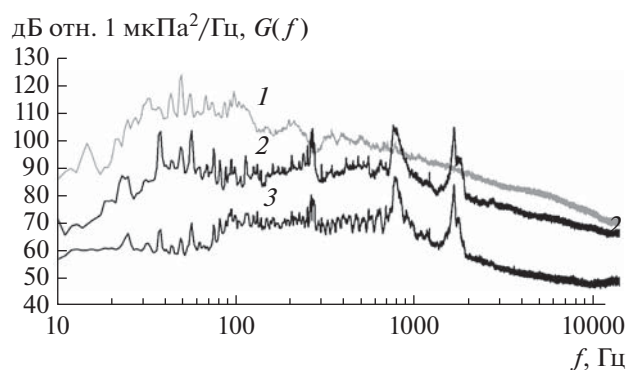


Рис. 8. Спектр, рассчитанный по результатам акустических измерений, проведенных в точке М-1.0 во время прохода ее траверза буксиром *Smit Sakhalin* – график 1 и графики спектров акустических шумов, синхронно измеренных в точке РА-В-20 – график 2 и в точке РА-В-10 – график 3 во время движения дизель-электрохода *Евгений Примаков* в точке S2 со скоростью 10 узлов.

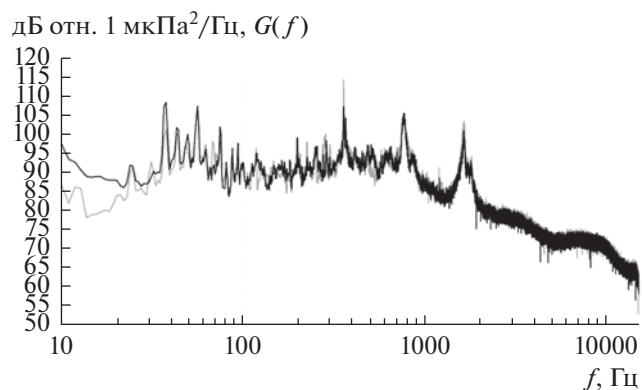


Рис. 9. Спектры акустических шумов, измеренных в точке РА-В-20 во время движения дизель-электрохода *Федор Ушаков* в точке S2 со скоростью 10 узлов левым и правым бортом по отношению к точке РА-В-20, в которой проводились измерения.

ного 3D геоакустического волновода строится эквивалентная точечная функция источника, сформировавшего акустический сигнал, который был измерен в опорной точке. Для построения эквивалентной точечной функции источника выбирается точка, удаленная от судна на 500 м, т.е. наблюдаемый в ней акустический сигнал определяется распространяющимися в сторону берега модами, которые рассчитываются в соответствии с параметрами акустического волновода, простирающегося от точки положения судна в *Пильтунский* прибрежный район кормления серых китов. При построении модельного 3D геоакустического волновода используются результаты многолетних батиметрических измерений, изме-

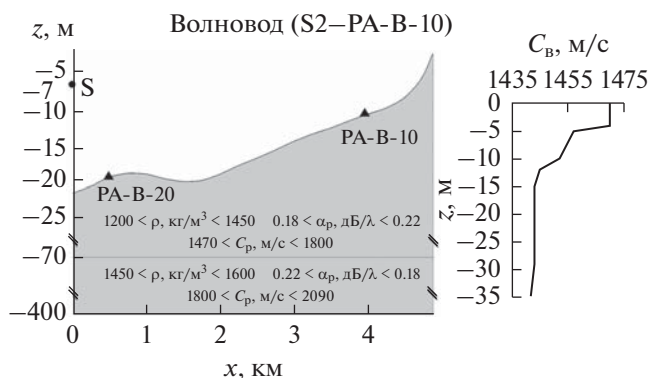


Рис. 10. Модельный геоакустический волновод.

ренные вертикальные профили скорости звука в воде и подобранные акустические параметры слагающих дно пород. Поскольку во время натурального эксперимента акустические измерения проводились в нескольких точках, в том числе на 10-метровой изобате, то представляется возможным в них сравнить экспериментальные и модельные значения спектров и значения уровня воздействия антропогенных шумов на среду $SEL(\Delta f; z, x, y)$.

Рассмотрим результаты модельных вычислений. При численном моделировании с помощью МПУ комплексный спектр эквивалентной точечной функции источника пересчитывается в узлы пространственной решетки в модельном 3D геоакустическом волноводе. Мы считаем, что наиболее наглядным интегральным параметром формируемого источником антропогенного акустического поля являются значения акустической экспозиции или энергии – $SEL(\Delta f)$ на 1 секундном интервале. В этом случае, оно по уровню равно среднеквадратичному значению $SPL_{\text{rms}}(\Delta f)$, поэтому на графиках будем представлять цветом распределение значений $SEL_{\text{Is}}(\Delta f; z, x, y)$ в вертикальной $SEL_{\text{Is}}(\Delta f; z, x, y = 0)$ и горизонтальной $SEL_{\text{Is}}(\Delta f; z = z_i, x, y)$ плоскостях.

Параметры модельного геоакустического волновода показаны на рис. 10. Считаем, что в волноводе с глубиной 400 м распространяются водные и водно-донные моды. Так, для частоты 10 Гц длина звуковой волны составляет менее 200 м, что

вдвое меньше толщины модельного геоакустического волновода.

На рис. 11а представлено распределение модельных значений $SEL_{\text{Is}}(10\text{--}2000 \text{ Гц}; z, x, y = 0)$ в вертикальной плоскости при распространении энергии акустических шумов, генерируемых движущимся в точке S2 со скоростью 10 узлов судном *Евгений Примаков* и в горизонтальной плоскости, на горизонте 7 м, значений $SEL_{\text{Is}}(10\text{--}2000 \text{ Гц}; z = 7 \text{ м}, x, y)$. На рис. 11 видно, что МПУ в приближении 3 адиабатических мод и “жидкого” дна формирует в водном слое вертикальную интерференционную структуру значений $SEL_{\text{Is}}(\Delta f; z, x, y = 0)$ в виде приповерхностного, срединного и придонного слоев относительно высокой интенсивности.

Рассмотрим результаты численного моделирования, проведенного для судна, работающего в режиме ДП в точке S7, которая расположена в 500 м от платформы ПА-Б. Модельные распределения значений $SEL(10\text{--}1000 \text{ Гц})$ в вертикальной и горизонтальной (на горизонте 7 м) плоскостях, представлены на рис. 11б. Результаты моделирования для судна, движущегося со скоростью 10 узлов в точке S5, представлены на рис. 11в. Для сравнения в табл. 1 представлены модельные и экспериментальные значения в точках акустического мониторинга при работе судна в режиме ДП в точке S7.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Проведены натурные измерения акустических шумов, формируемых на восточной границе и внутри прибрежного *Пилтунского* района летне-осеннего нагула серых китов, новыми судами дизель-электроходами, работающими в режиме динамического позиционирования возле платформ ПА-Б и *Моликпак* и во время их движения со скоростью 10 узлов возле 20-метровой изобаты и около платформы ПА-Б.

По результатам специальных измерений, проведенных в 500 м восточней точки акустического мониторинга ПА-В-20, построены эквивалентные точечные функции источников (судов), соответствующие двум режимам работы судна – динамическому позиционированию и движению со скоростью 10 узлов.

Таблица 1. Значения $SEL_{\text{Is}}(10\text{--}1000 \text{ Гц})$

Точка мониторинга	SEL (эксперимент), дБ	SEL (модель), дБ
Odoptu-104	97.9	96.4
ПА-В-20	107.1	105.5
ПА-В-10	98.7	96.9

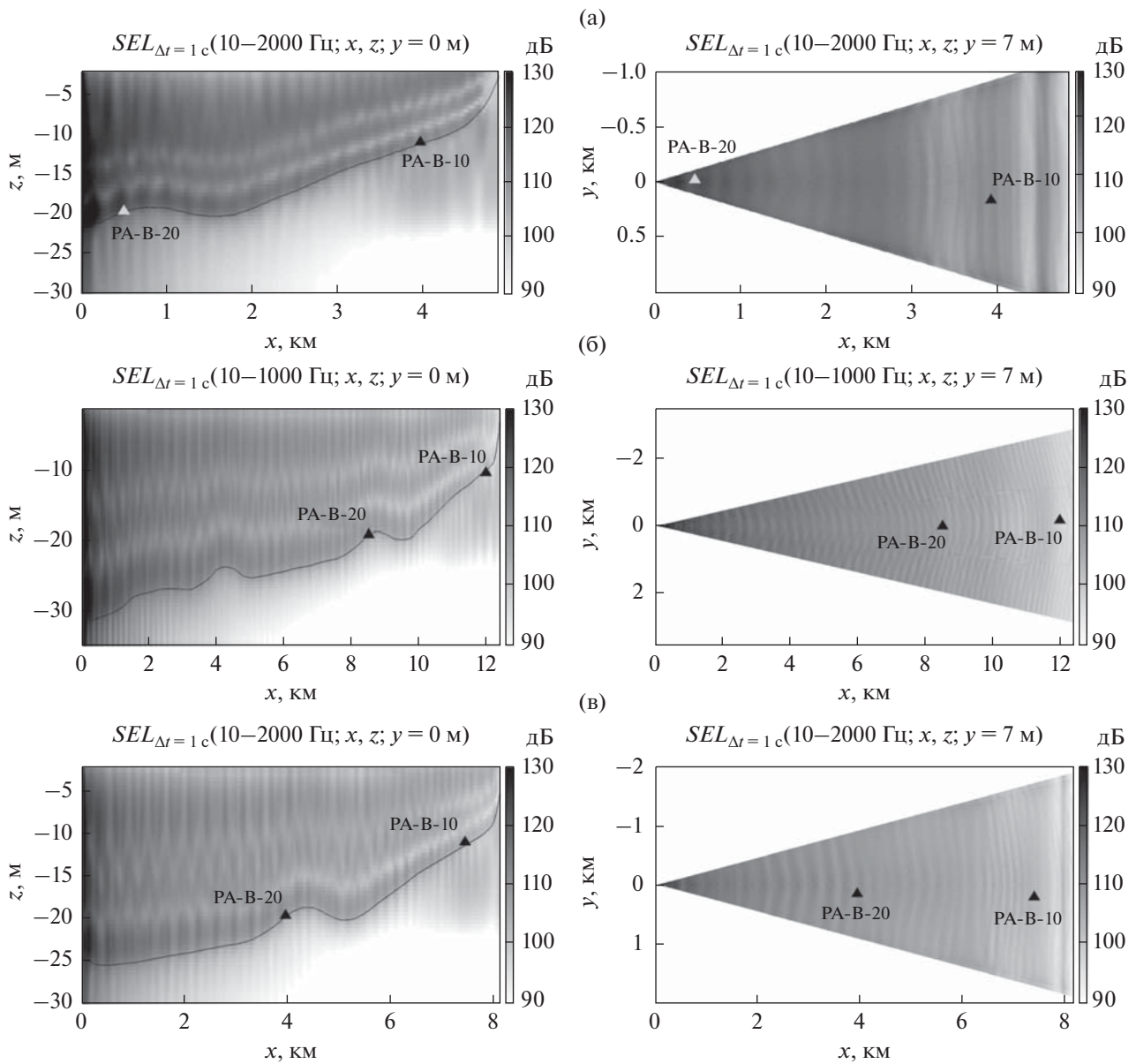


Рис. 11. (а) – Поле значений $SEL_{\Delta t=1c}(10-2000 \text{ Гц}; x, z; y = 0 \text{ м})$ и $SEL_{\Delta t=1c}(10-2000 \text{ Гц}; x, y; z = 7 \text{ м})$ при движении судна со скоростью 10 узлов в точке S2. (б) – Поле значений $SEL_{\Delta t=1c}(10-1000 \text{ Гц}; x, z; y = 0 \text{ м})$ и $SEL_{\Delta t=1c}(10-1000 \text{ Гц}; x, y; z = 7 \text{ м})$ при работе судна в режиме ДП в точке S7. (в) – Поле значений $SEL_{\Delta t=1c}(10-2000 \text{ Гц}; x, z; y = 0 \text{ м})$ и $SEL_{\Delta t=1c}(10-2000 \text{ Гц}; x, y; z = 7 \text{ м})$ во время движения судна со скоростью 10 узлов в точке S5.

Для построенных эквивалентных точечных функций источников с помощью модового параболического уравнения для 3D модельных геоакустических волноводов проведено численное моделирование формируемых в *Пильтунском* районе антропогенных акустических полей данным типом судов ледового плавания дизель-электроходами. Результаты моделирования согласуются с натурными измерениями.

Сравнительный анализ показал, что новые суда ледового плавания дизель-электроходы *Геннадий Невельской*, *Федор Ушаков* и *Евгений Примаков* с

двигателями *AZIPOD*, установленными в подводных гондолах, по сравнению с обычными буксирами типа *Smit Sakhalin* во всех режимах формируют уровни антропогенных шумов в *Пильтунском* районе на 15–30 дБ ниже. Важно, что при работе с платформой в режиме динамического позиционирования, данные суда не формируют в районе кормления китов “заметных” широкополосных шумов, уровни узкополосных тональных шумов на 10-метровой изобате не превышают 95 дБ отн. 1 мкПа²/Гц.

Решена экспериментально-теоретическая задача – построены спектры точечных источников, эквивалентных шумам, генерируемым в данной акватории вспомогательными судами, работающими с платформами ПА-Б и Моликнак, позволяющие корректно оценивать уровни антропогенных шумов, формируемых судами в прибрежном Пильтунском районе кормления серых китов.

Полученные в работе результаты, безусловно, будут полезны для оценок влияния антропогенных акустических шумов в других районах океанского шельфа.

В заключение, выражаем благодарность компании “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” и ее сотрудникам и консультантам, без участия которых данная работа не могла быть выполнена. Среди них следует отметить Сергея Виноградова и Сергея Стародымова. Выражаем благодарность компании “Эксон Нефтегаз Лимитед” за выделенное судовое время на постановки в море и подъем акустических станций, а также сотрудникам ТОИ ДВО РАН, принявшим активное участие в полевых исследованиях, это Д.Г. Ковзель, С.В. Борисов и В.А. Гриценко.

Работа выполнена при финансовой поддержке компании “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин С.А., Язвенко С.Б., Владимиров В.Л., Лагерев С.И. Численность, распределение и характер поведения серого кита (*Eschrichtius robustus*) на основании авиационных наблюдений на северо-восточном шельфе острова Сахалин летом и осенью 2001 г. // Доклад на конф. Морские млекопитающие в удаленных районах Арктики, 11–13 сентября 2002 г., озеро Байкал, Россия.
2. Турнева О.Ю., Маминов М.К., Швецов Е.П., Фадеев В.И., Селин Н.И., Яковлев Ю.М. Сезонные перемещения серых китов (*Eschrichtius robustus*) между кормовыми районами на северо-восточном шельфе о. Сахалин // Морские млекопитающие Голарктики: Сб. науч. трудов 4-ой междунар. конф. Изд. СПб Университета, 2006. С. 530–535.
3. Владимиров В.А., Стародымов С.П., Афанасьев-Григорьев А.Г., Корниенко М.С. Распространение и численность серых китов охотско-корейской популяции в водах северо-восточного Сахалина / Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2010. № 19. С. 50–64.
4. Круглов М.В., Рутенко А.Н. Расчет уровней акустических шумов на границах районов кормления серых китов во время проведения строительных работ на северо-восточном шельфе о. Сахалин / Сборник трудов XI школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2006. С. 340–343.
5. Рутенко А.Н., Гриценко В.А. Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
6. Racca R., Rutenko A., Broker K., Gailey G. Model based sound level estimation and in-field adjustment for real-time mitigation of behavioral impacts from a seismic survey and post-event evaluation of sound exposure for individual whales // Proceedings of Acoustics 2012. 21–23 November 2012, Fremantle, Australia.
7. Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Оценки акустических шумов, генерируемых вспомогательными судами, работающими с нефтедобывающими платформами // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 5. С. 605–613.
8. Nganninen S., Heideman T. Breakthrough in Arctic Shipping // Offshore Technology Conference. OTC Arctic Technology Conference, 23–25 March 2015, Copenhagen, Denmark.
9. Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Рутенко А.Н., Ущиповский В.Г. Автономная гидроакустическая станция с радиоканалом для акустических измерений на шельфе // Приборы и техника эксперимента. 2008. № 5. С. 132–137.
10. Рутенко А.Н., Борисов С.В., Ковзель Д.Г., Гриценко В.А. Радиогидроакустическая станция для мониторинга параметров антропогенных импульсных и шумовых сигналов на шельфе // Акуст. журн. 2015. Т. 61. № 4. С. 500–511.
11. Рутенко А.Н. Натурные и модельные исследования распространения сейсмоакустических сигналов в 3-D геоакустических волноводах с сухопутным участком / Сборник трудов XV школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 80–83.
12. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Воекхольт М. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсморазведочных импульсов // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
13. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Путлов В.Ф., Соловьев А.А., Манульчев Д.С. Мониторинг антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин во время сейсморазведочных исследований // Акуст. журн. 2016. Т. 62. № 3. С. 348–362.
14. Petrov P.S., Trofimov M.Yu., Zakharenko A.D. Mode parabolic equations for the modeling of three-dimensional sound propagation effects in shallow water // Proc. 11th European Conference on Underwater Acoustics. 2–6 th July 2012, GB Edinburgh. P. 53–60.
15. Trofimov M.Y., Kozitskiy S.B., Zakharenko A.D. A mode parabolic equation method in the case of the resonant mode interaction // Wave Motion. 2015. V. 58. P. 42–52.
16. Манульчев Д.С. Построение функции источника для 3-D моделирования импульсного акустического поля, формируемого на шельфе излучающим комплексом сейсморазведочного судна / Сборник трудов XV школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 72–75.

17. Рутенко А.Н., Фершалов М.Ю., Jenkerson M.R. 3-D моделирование акустического поля, формируемого на шельфе во время забивки фундаментных свай на берегу / Сборник трудов XV школы-семинара им. академика Л.М. Бреховских “Акустика океана”. М.: ГЕОС, 2016. С. 240–243.
18. Underwater noise Measurements of the Gennadiy Nevelskoy / Doc. No. Luode-25012017-UWN-Gennadiy Nevelskoy-A (2017). 13 p.
19. DNV. Rules of Classification of Ships – Silent Class Notation Det Norske Veritas. Norway. 2010. <http://www.dnv.com>
20. Bahtiaran M.A. ASA standard goes underwater // Acoust. Today. 2009. V. 5. № 4. P. 26–29.
21. McKenna M.F., Ross D., Wiggins S.M., Hildebrand J.A. Underwater radiated noise from modern commercial ships // J. Acoust. Soc. Am. 2012. V. 131. № 1. P. 92–103.