

ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫМИ СУДАМИ, РАБОТАЮЩИМИ С НЕФТЕДОБЫВАЮЩИМИ ПЛАТФОРМАМИ

© 2015 г. А. Н. Рутенко, В. Г. Ущиповский

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН

690041 Владивосток, ул. Балтийская 43

E-mail: rutenko@poi.dvo.ru

Поступила в редакцию 13.10.2014 г.

Приводятся результаты пространственных измерений акустических шумов, генерируемых буксирами двух типов во время их движения около платформы “Моликпак” и в режиме динамического позиционирования во время работы с платформой “ПА-Б”. По результатам этих измерений с помощью моделирования и предварительных исследований функции потерь, проведенных на акустических профилях, простирающихся от платформ в прибрежный Пильгунский район летне-осеннего нагула серых китов, построены спектры эквивалентных точечных источников, которые позволяют построить 1/3-октавные спектры антропогенных шумов в любой точке на заданном профиле и оценить значение их уровня в заданной полосе частот с точностью до 2 дБ. Натурные измерения показали, что в режиме динамического позиционирования буксиры шумят примерно на 10 дБ больше, чем во время движения, причем буксир дизель-электроход в обоих режимах шумит примерно на 5 дБ меньше буксира с дизельным двигателем.

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

DOI: 10.7868/S0320791915040103

ВВЕДЕНИЕ

Для освоения углеводородного Пильгун-Астохского месторождения, расположенного на северо-восточном шельфе о. Сахалин, компания “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.” установила в море две платформы: “Моликпак” и “ПА-Б”. На рис. 1 видно, что они удалены на 8–10 км от 20-метровой изобаты, являющейся восточной границей прибрежного Пильгунского района летне-осеннего нагула западной (охотско-корейской) популяции серых китов, занесенных в “Красную книгу РФ” [1–3]. Поэтому при разработке данного месторождения особое внимание уделяется контролю уровней антропогенных акустических шумов, формируемых в районе производственной деятельностью компаний [4–6].

Многолетние наблюдения за распределением серых китов в этом районе [2, 3] показали, что киты кормятся на глубинах 6–15 метров. Следовательно, результаты ежегодных акустических измерений, проводимых с помощью автономных подводных акустических регистраторов (АПАР) [7], устанавливаемых в точках, показанных на рис. 1, характеризуют вариации уровней фоновых и антропогенных шумов на восточной границе и внутри

прибрежного Пильгунского 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 “Эксон Нефтегаз Лимитед” и “Сахалин Энерджи Инвестмент Компани Лтд.”, проводились гидрологические и батиметрические измерения, а также специальные исследования потерь при распространении звука вдоль акустических профилей, простирающихся от места установки потенциального источника антропогенных шумов в традиционные районы кормления серых китов. Эти данные позволили построить адекватные экспериментальным данным теоретические модели, которые делают возможным в пределах изученного района предсказывать уровни шумов, формируемых известными источниками с заданным расположением [8–10].

Акустические измерения, проводимые в точках мониторинга ПА-Б-20 и Моликпак, показали, что уровни антропогенных шумов от механизмов и устройств, работающих на соответствующих

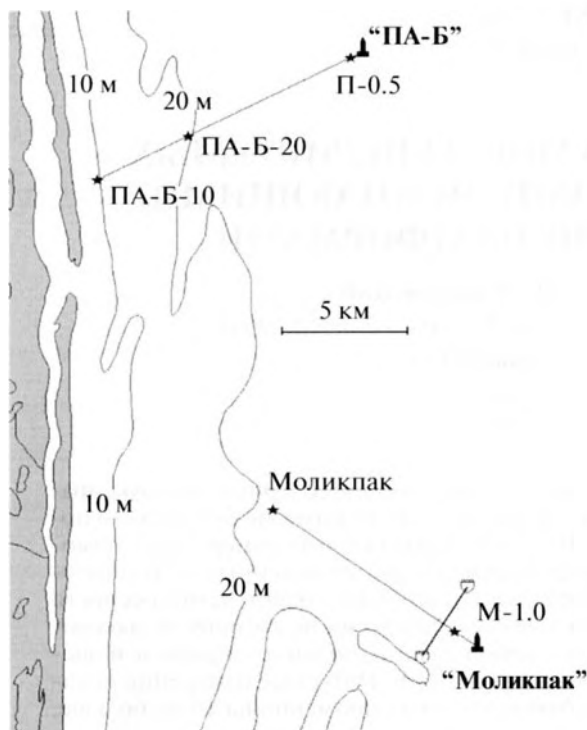


Рис. 1. Карта района с указанием точек расположения газо-нефтедобывающих платформ “ПА-Б”, “Моликпак”, трека на котором проводились измерения шумов от движущегося судна, точек ежегодного акустического мониторинга (отмечены звездочками): ПА-Б-20, ПА-Б-10, Моликпак и двух точек, расположенных около платформ – П-0.5 и М-1.0.

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 возле платформы “Моликпак” и в режиме динамического позиционирования возле платформы “ПА-Б”. Ниже приводятся результаты этих натуральных и модельных исследований.

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА

Стационарные измерения у дна вариаций акустического давления в частотном диапазоне 2–15000 Гц проводились с помощью гидрофона типа Ги-50, установленного на резиновых амортизаторах в пирамидке, изготовленной из стального прутка. В точках ежегодного акустического мониторинга измерения проводились с помощью АПАР [7], 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, тогда как у АПАР автономность 52 сут.

Для теоретических расчетов распространения тональных сигналов использовали адаптирован-

ную программу RAMS [11], основанную на решении широкоугольных параболических уравнений [12], полученных из стационарных уравнений Ламе в цилиндрических координатах. Эта программа позволяет учитывать упругие свойства пород, слагающих дно.

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. Также применялись распределения акустических параметров пород, слагающих дно, полученные в результате специальных натуральных и теоретических исследований. Они были получены на акустических профилях – *TLP* (несколько стационарных точек приема и много квазистационарных точек излучения), близких к трассе распространения шумов, генерируемых судном, до точки приема.

При численном моделировании акустического поля, формируемого точечным тональным источником в заданном двухмерном геоакустическом волноводе, известно распределение поля скорости звука в водном слое $C(z, r)$ и профиль дна, которые были специально измерены во время эксперимента с судном. Распределение основных акустических параметров в дне было взято из результатов экспериментально-теоретических исследований, проведенных в 2006 г. на акустическом профиле, близком к акустической трассе “Моликпак”– Моликпак, показанной на рис. 1.

С 2004 г. в ежегодных биолого-акустических экспедициях проводится контроль уровней антропогенных шумов, формируемых в прибрежном Пильтунском районе кормления серых китов производственной деятельностью платформ “Моликпак” и “ПА-Б”, показанных на рис. 1. Акустический мониторинг, в сочетании с наблюдениями за физическим состоянием серых китов с помощью методов фотоидентификации [13], внутрисезонным их распределением [3] и кормовой базой [14], дает необходимую информацию об условиях существования данной популяции в этом важном районе ее кормления.

В течение нескольких лет в этих экспедициях проводились специальные исследования затухания при распространении звука вдоль акустических профилей, простирающихся от места установки потенциального источника антропогенных шумов в данный район нагула китов. Для измерения потерь при распространении звука с частотами 15–15000 Гц применялись частотно-модулированные и тональные сигналы, которые генерировались широкополосным излучателем пьезокерамического типа и резонансным излу-

телем электромагнитного типа, работающим в нелинейном режиме с излучением интенсивных гармоник, кратных резонансной частоте [15]. В результате обработки были получены файлы, соответствующие определенным точкам излучения и приема, а также заданному в расписании режиму излучения. В этих файлах указывались значения частот и значения измеренного с помощью гидрофона АПАР, установленного в 25 см от дна, уровня спектральной плотности мощности $G_{1м}(f)$ акустических сигналов, измеренных на этих частотах на расстоянии 1 м от излучателя, и $G_r(f)$ — на расстоянии r от излучателя. Затем эти таблицы объединялись в общий массив, и значения

$$TL_{\text{exp}}(f, r) = 10 \lg \left(\frac{G_r(f)}{G_{1м}(f)} \right)$$

для уменьшения влияния пространственной и частотной интерференции усреднялись в 1/3-октавных частотных диапазонах. Далее значения эмпирической функции потерь $TL_{\text{exp}}(f, r)$ сравнивались со значениями модельной функции потерь $TL_{\text{mod}}(f, r)$, полученной с помощью метода широкоугольного параболического уравнения для некоторых наборов параметров слоистого морского дна, с помощью их вариаций достигалось наилучшее согласие модельных значений с экспериментальными, и этот набор параметров в дальнейшем использовался в модельном геоакустическом волноводе.

В данной работе для анализа были выбраны результаты акустических измерений, проведенных для буксиров “Smit Sakhalin” и “Pacific Endurance” с подобными характеристиками, но второй буксир является дизель-электроходом. Его два гребных винта вращаются электродвигателями, и поэтому у него нет длинных гребных валов, вызывающих вибрации корпуса судна. Для построения спектра антропогенных шумов, генерируемых буксиром при движении около платформы в типовом режиме, был определен трек, показанный на рис. 1 и ориентированный перпендикулярно акустической трассе М-1.0 “Моликпак”, пересекающий ее на расстоянии 600 м от точки акустических измерений М-1.0. Во время измерений судно проходило по этому треку, затем разворачивалось на 180° и проходило трек еще раз. Таким образом мы получали оценки спектров, формируемые на траверзе правого и левого борта. Конечной целью этих измерений было построение эквивалентного 1/3-октавного спектра точечного источника, расположенного на глубине 6 м в точке пересечения треком акустической трассы “М-1.0 Моликпак”. Поскольку во время движения судна в точке Моликпак с помощью АПАР были проведены синхронные с точкой М-1.0 акустические измерения, то была возможность экспериментально проверить возможность моделирования его эквивалентного спектра для построения оценок уровней ан-

тропогенных шумов, формируемых данным судном в прибрежном Пильгунском районе кормления серых китов при его типовом движении возле платформы “Моликпак”. Для этого по результатам измерений в точке М-1.0 с помощью программы RAMS в модельном геоакустическом волноводе с акустическими параметрами дна, подобранными в предшествующих экспериментально-теоретических исследованиях, строился 1/3-октавный спектр эквивалентного судну точечного источника, а затем он пересчитывался в точку Моликпак, удаленную на 8.4 км (см. рис. 1) и сопоставлялся с экспериментальным спектром.

ПОСТРОЕНИЕ СПЕКТРОВ СУДОВЫХ ШУМОВ НА ОСНОВЕ НАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

При построении спектра точечного источника, формирующего на шельфе антропогенное акустическое поле, эквивалентное полю от движущегося судна, применялась модифицированная методика, представленная в работах [16, 17]. По-видимому, наша задача сложнее, поскольку надо построить эквивалентный точечный источник для судна, длина которого более чем в два раза больше глубины моря, и конечной целью являлся 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 6–10 длин корпуса судна, а вторая расположена в районе, где требуются оценки антропогенных шумов от этого судна. На рис. 1 это трасса “Моликпак”—Моликпак.

В данной работе решена экспериментально-теоретическая задача — построены спектры точечных источников, эквивалентных шумам, генерируемым в данной акватории вспомогательными судами, работающими с платформой “Моликпак”, для корректного оценивания уровней антропогенных шумов, формируемых ими в прибрежном Пильгунском районе кормления серых китов. Для ее решения на основе предварительных экспериментально-теоретических исследований должен быть построен 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 [9].

С помощью результатов спектрального анализа акустических шумов (см. рис. 2), измеренных

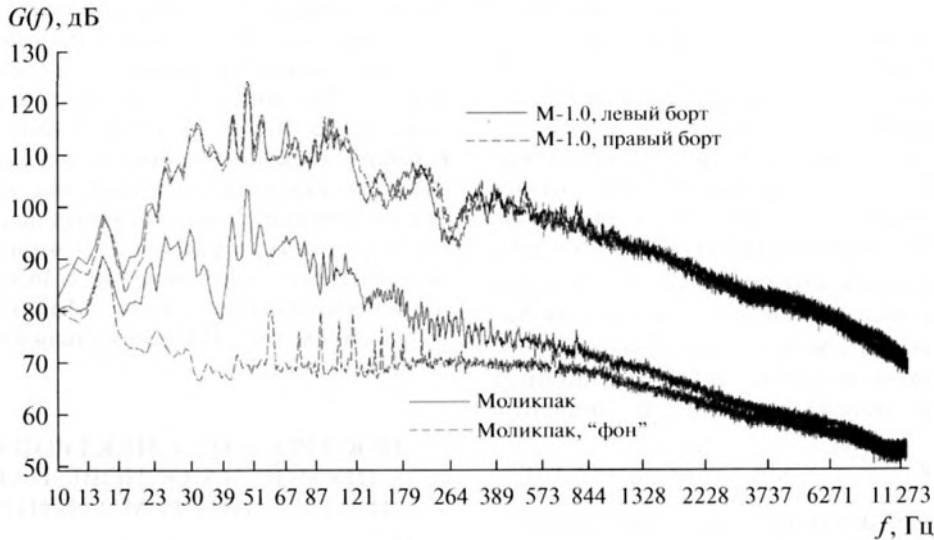


Рис. 2. Спектры шумов, рассчитанные по результатам акустических измерений, проведенных в точках М-1.0 и Моликпак во время прохода буксира "Smit Sakhalin" со скоростью 10 узлов траверза точки М-1.0, и спектр "фоновых" шумов, измеренных в точке Моликпак.

в точках М-1.0 и Моликпак во время движения буксира "Smit Sakhalin" по трек, показанному на рис. 1, поясним методику построения спектральной функции его эквивалентного точечного источника. На рис. 2 показаны графики оценок спектров акустических шумов, полученные в результате усреднения значений периодограмм, рассчитанных по 60 односекундным реализациям. При движении со скоростью 10 узлов за 60 с буксир прошел путь, равный 311 м. Поскольку длина буксира равна 79 м, а его осадка 8 м, то представленные спектры характеризуют распространяющиеся антропогенные шумы, формируемые у дна в море глубиной 30 м на траверзе 600–640 м. На этом рисунке видно, что графики спектров для левого и правого борта практически совпадают.

На рис. 2 видно, что в точке Моликпак в диапазоне 20–4000 Гц уровни антропогенных шумов от буксира превышают уровни условно фоновых шумов, поскольку в графике "фон" отчетливо выражены тональные компоненты индустриального происхождения. Известно, что тональная компонента с частотой 15 Гц, которая хорошо выражена на всех графиках, генерируется на платформе "Моликпак", и согласно рис. 2 при распространении вдоль акустической трассы "М-1.0–Моликпак" протяженностью 9 км относительные потери для нее составляют –9 дБ. Поскольку длина акустической волны в воде с такой частотой равна 100 м, то, по-видимому, ее энергия распространяется в дне, озвучивая водный слой.

Введем обозначения:

• f_i [Гц] – средняя (центральная) частота 1/3-октавного диапазона;

• Δf_i [Гц] – ширина 1/3-октавного диапазона со средней частотой f_i ;

• $G_{\text{exp}}(f)$ [Па²/Гц] – экспериментальное значение спектральной плотности мощности акустических шумов в 1 Гц-частотном окне, полученное с помощью усреднения значений n периодограмм, рассчитанных с помощью БПФ по односекундным реализациям $p(t)$;

• $G_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} G_{\text{exp}}(f) df}{\Delta f_i}$ [Па²/Гц] – среднее в 1/3-октавном диапазоне Δf_i экспериментальное значение спектральной плотности мощности, приведенное к полосе 1 Гц, $\Delta f_i = f_2 - f_1$, $f_i = \frac{f_1 + f_2}{2}$.

• $\hat{G}_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i)$ [дБ], $\hat{G}_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i) = 10 \lg \left(\frac{G_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i) \Delta f_0}{p_0^2} \right)$, где $p_0 = 1$ мкПа, $\Delta f_0 = 1$ Гц.

• Модельный геоакустический волновод (см. рис. 3а) – вертикальный разрез с ортогональными координатами z и r . Точечный источник S расположен на горизонте $z = z_s$, соответственно $r = 0$. В модельном волноводе известны профиль дна и распределение значений скорости звука в воде. Распределение основных акустических параметров в дне подбирается с помощью согласования результатов моделирования с натурными измерениями.

• $TL_{\text{mod}}(f_i, r)$ [дБ] – модельная (теоретическая) функция потерь для тонального сигнала, генерируемого с частотой f_i точечным источником S и распространяющегося в данном волноводе (см. рис. 3б).

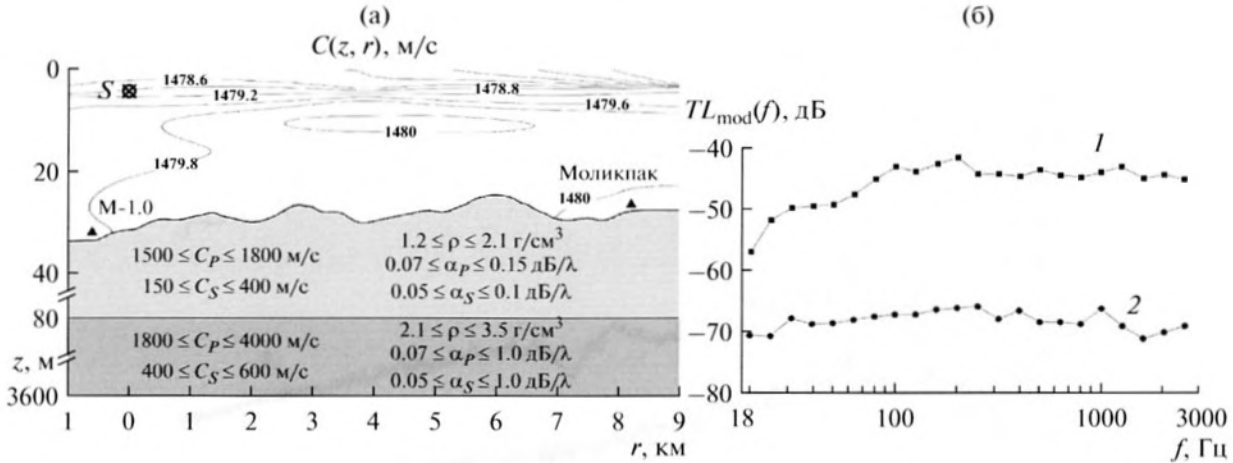


Рис. 3. (а) Параметры модельного геоакустического волновода “М-1.0–Моликпак”. (б) Теоретические значения потерь для тональных акустических сигналов, генерируемых точечным источником S и распространяющихся вдоль акустических трасс “ $S-M-1.0$ ”, $r = 600$ м (график 1) и “ $S-Molikpak$ ”, $r = 8.4$ км (график 2). S – точечный акустический источник, эквивалентный движущемуся судну.

Рассчитывается с помощью модернизированной программы RAMS [11].

• $\hat{G}_{exp}^{1/3-oct}(f_i, r)$ – среднее в диапазоне Δf_i , приведенное к 1 Гц в дБ, значение спектральной плотности мощности акустического шума, измеренного на дистанции r от судна.

• $\hat{G}_S^{1/3-oct}(f_i, r_{1m}) = \hat{G}_{exp}^{1/3-oct}(f_i, r) - TL_{mod}(f_i, r)$ – значения в децибелах спектральной плотности мощности эквивалентного точечного источника на расстоянии 1 м.

Отметим, что в графиках $TL_{mod}(f_i)$ рис. 3б частотная интерференция подавлена за счет пространственного усреднения модельных значений в прямоугольнике с $\Delta z = 2$ м и $\Delta r = 100$ м, а в экспериментальном спектре измеренных шумов $\hat{G}_{exp}^{1/3-oct}(f_i, r)$ интерференция уменьшена благодаря усреднению значений $G_{exp}(f)$, попавших в 1/3-октавное окно со средней частотой f_i , а также благодаря перемещению за время реализации судна примерно на 311 м по треку, перпендикулярному трассе (см. рис. 1).

На рис. 4 показан спектр соответствующего эквивалентного точечного источника антропогенных шумов и приведены модельные значения, полученные для точки мониторинга Моликпак, удаленной от S на 8.4 км. На этом рисунке видно хорошее согласие теоретических значений с экспериментальными, т.е. графики экспериментального и модельного 1/3-октавных спектров подобны и согласуются количественно. Проверим количественное согласие с помощью сравнения значений $SPL_{rms}(18-3000 \text{ Гц})$, рассчитанных по экспериментальному одногерцовому спектру, показанному на рис. 4 толстой линией, $SPL_{rms}(18-3000 \text{ Гц}) = 114$ дБ отн. 1 мкПа, и по модельным значениям

ям, показанным на этом рисунке кружками с точкой в центре. Модельное значение равно $SPL_{rms}(18-3000 \text{ Гц}) = 113$ дБ отн. 1 мкПа.

Расчеты были проведены с помощью следующих формул:

$$SPL_{rms}^{exp}(18-3000 \text{ Гц}) = 20 \lg \frac{\sqrt{\int_{18}^{3000} G_{exp}(f) df}}{p_0} \text{ дБ отн. 1 мкПа,}$$

где $p_0 = 1$ мкПа.

Соответственно,

$$SPL_{rms}^{mod}(18-3000 \text{ Гц}) = 20 \lg \frac{\sqrt{\sum_i G_{model}(f_i) \Delta f_i}}{p_0}.$$

При пересчете экспериментального одногерцового спектра в 1/3-октавный экспериментальный спектр пользовались тождеством

$$G_{exp}^{1/3-oct}(f_i) \Delta f_i = \int_{f_1}^{f_2} G_{exp}(f) df,$$

где $\Delta f_i = f_2 - f_1$. Соответственно, модельный 1/3-октавный спектр $G_{model}^{1/3-oct}(f_i)$ строится по результатам моделирования значений функции потерь $TL(f_i, r)$, рассчитанных для тональных сигналов с частотой f_i в приближении того, что шумы в 1/3-октавном частотном диапазоне Δf_i с центральной частотой f_i эквивалентны “белому шуму”.

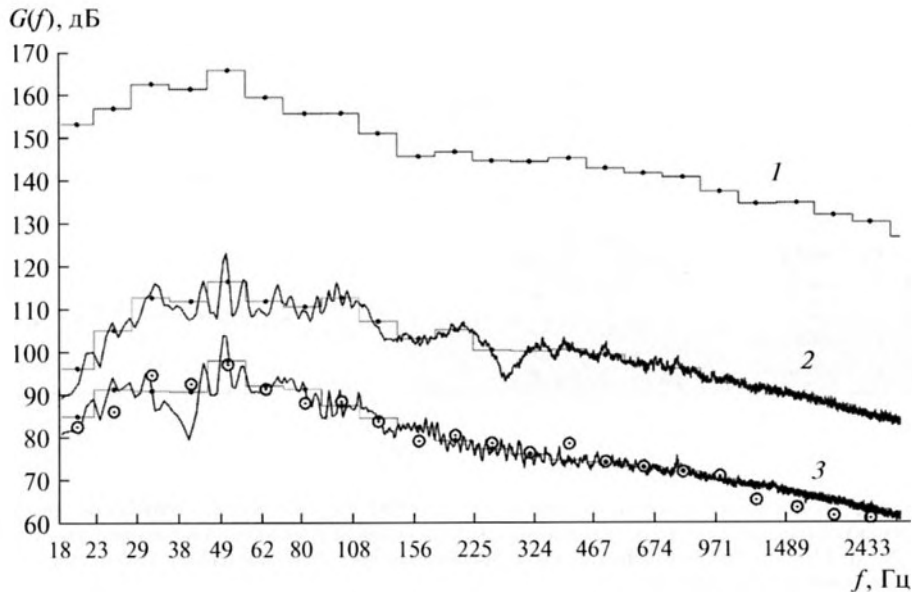


Рис. 4. Графики экспериментальных $\hat{G}_{\text{exp}}(f)$ — кривая линия и $\hat{G}_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i)$ — горизонтальные линии, соответствующие 1/3-октавному частотному диапазону Δf_i с точкой, указывающей на его центральную частоту f_i . Графики 2 и 3 построены по результатам синхронных измерений, проведенных в точках М-1.0 и Моликпак во время пересечения буксиром “Smit Sakhalin” акустической трассы “М-1.0–Моликпак”. График 1 иллюстрирует $\hat{G}_S^{1/3\text{-oct}}(f_i, z = 6 \text{ м}, r_M) = \hat{G}_{\text{exp}}^{1/3\text{-oct}}(f_i, r_{\text{М-1.0}}) - TL_{\text{mod}}(f_i, r_{\text{М-1.0}})$, а кружки с точками соответствуют модельным значениям $\hat{G}_{\text{mod}}^{1/3\text{-oct}}(f_i, r_{\text{Моликпак}}) = \hat{G}_S^{1/3\text{-oct}}(f_i, z = 6 \text{ м}, r_M) + TL_{\text{mod}}(f_i, r_{\text{Моликпак}})$.

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ БУКСИРОМ ПРИ ДВИЖЕНИИ И В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Замечено, что вибрации на борту судна, работающего в режиме динамического позиционирования (DP), значительно выше, чем когда оно равномерно движется. В связи с этим представляют интерес натурные акустические измерения шумов, генерируемых судами во время работы с платформой “ПА-Б”, поскольку в этом случае судно продолжительное время работает в режиме DP, и у нас есть акустическая трасса “ПА-Б” — ПА-Б-10, показанная на рис. 1, с тремя точками, в которых проводились синхронные акустические измерения: П-0.5, ПА-Б-20, ПА-Б-10.

На рис. 5 приведен спектр акустических шумов, измеренных в точке П-0.5 (см. рис. 1) во время работы буксира “Smit Sakhalin” с платформой “ПА-Б” в режиме DP. В этом случае расстояние от точки акустических измерений П-0.5 до судна, работающего с платформой “ПА-Б”, было равно примерно 600 м. Для сравнения на этом же рисунке приведен график спектра акустического шума, измеренного в точке М-1.0 во время движения этого буксира по треку, показанному на рис. 1, со скоростью 10 узлов. Из рис. 1 видно, что в этом случае расстояние от точки акустических измере-

ний М-1.0 до судна на траверзе было также равно 600 м. Видно, что в море глубиной ≈ 30 м уровень антропогенных шумов от этого судна в режиме DP практически на всех частотах превышает уровень шумов, формируемых этим судном при его равномерном движении. Расчеты значений $SPL_{\text{rms}}^{\text{exp}}$ (18–3000 Гц) показали: П-0.5 — 148.0 дБ; М-1.0 — 135.5 дБ.

СРАВНЕНИЕ УРОВНЕЙ ШУМОВ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ БУКСИРАМИ РАЗНОГО ТИПА

Для сравнения рассмотрим спектры акустических шумов, генерируемых буксирами с примерно одинаковыми параметрами, но движителями разного типа. Это буксир ледового класса “Smit Sakhalin” (1983, Канада): водоизмещение 5597 т, длина 79 м, ширина 17.6 м, осадка 8.2 м, максимальная скорость движения 14 узлов, и “Pacific Endurance” (2006, Румыния): водоизмещение 8911 т, длина 91.5 м, ширина 19 м, осадка 8.25 м, скорость 15 узлов. Буксиры отличаются движителями, обеспечивающими вращение гребных винтов. У “Pacific Endurance” это два электродвигателя мощностью 7000 кВт каждый и две винторулевые колонки с 4-лопастными винтами, а у “Smit Sakhalin” — четыре двигателя мощностью 2739 кВт каждый

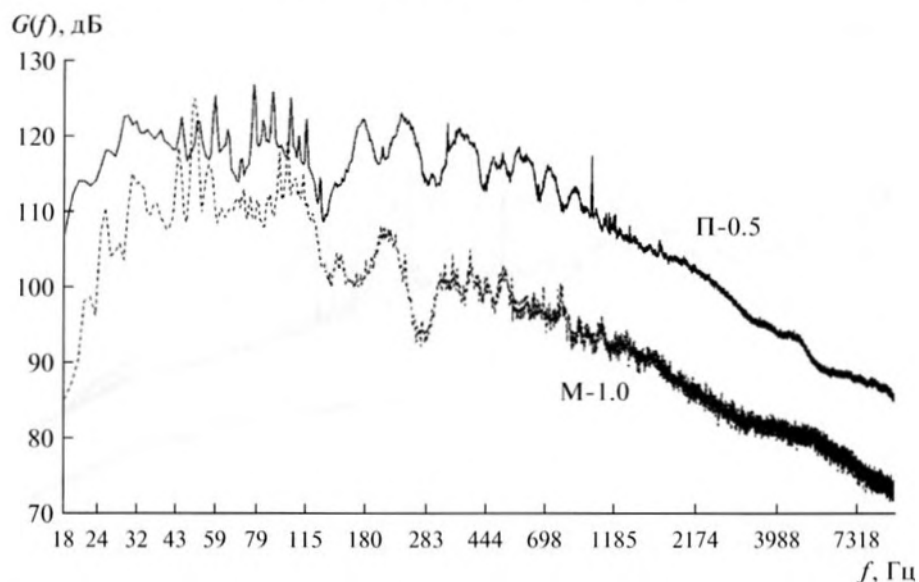


Рис. 5. Спектры шумов от буксира "Smit Sakhalin" работающего возле платформы "ПА-Б" в режиме динамического позиционирования – график П-0.5 и во время движения со скоростью 10 узлов, на расстоянии 600 м от точки М-1.0.

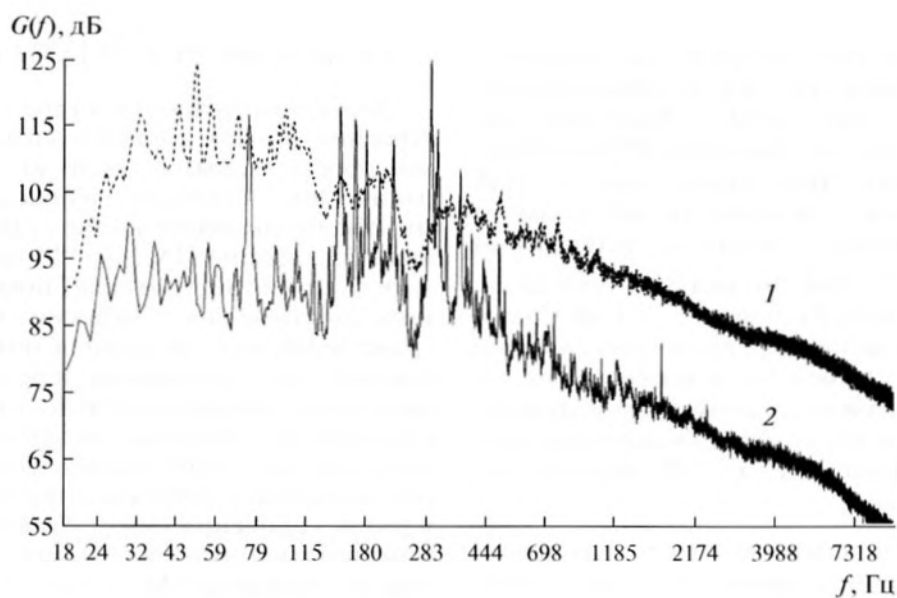


Рис. 6. Спектры, рассчитанные по результатам акустических измерений, проведенных в точке М-1.0 на временных интервалах, соответствующих проходам ее траверза буксирами "Smit Sakhalin" (график 1) и "Pacific Endurance" (график 2) со скоростью 10 узлов.

и два 4-лопастных винта с регулируемым шагом. Необходимая для движения электроэнергия генерируется на борту "Pacific Endurance" с помощью четырех дизель-генераторов мощностью 4320 кВт каждый.

Таким образом, буксир "Pacific Endurance" по всем характеристикам превосходит буксир "Smit Sakhalin", и поэтому особый интерес представляет сравнение уровней акустических шумов, которые они формируют на шельфе при движении с

одинаковыми скоростями и во время работы в режиме DP. На рис. 6 представлены графики спектров акустических шумов, измеренных в точке М-1.0 во время пересечения ее траверза (см. рис. 1) данными буксирами, движущимися со скоростью 10 узлов.

Из рис. 6 видно, что уровни широкополосных шумов от буксира "Pacific Endurance" на всех частотах в среднем на 20 дБ меньше, чем от буксира "Smit Sakhalin", но в его спектре ярко выражены то-

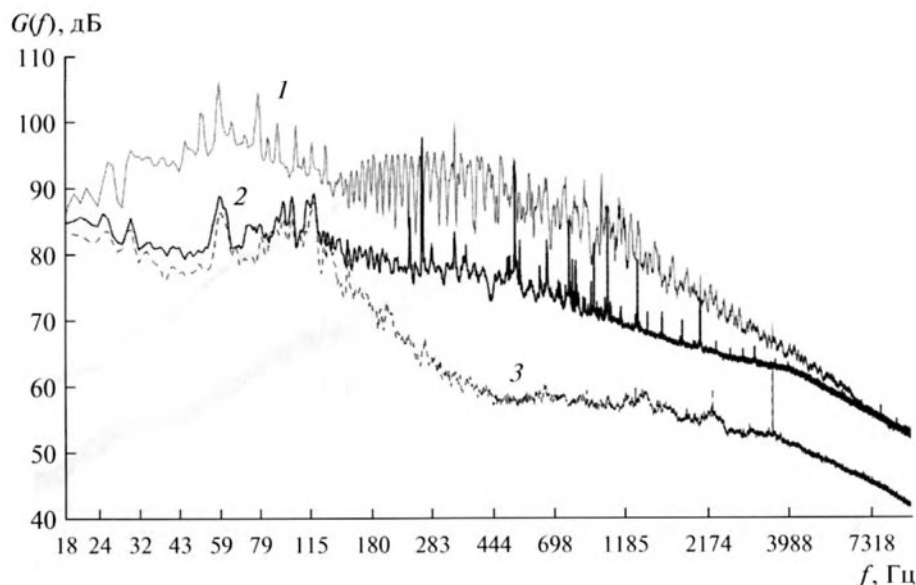


Рис. 7. Спектры шумов от буксиров “Smit Sakhalin” (1) и “Pacific Endurance” (2), работающих в режиме динамического позиционирования у платформы “ПА-Б”, измеренные в точке ПА-Б-20. Цифрой 3 обозначен спектр окружающего шума в точке ПА-Б-20 в условиях отсутствия работающих судов.

нальные компоненты, которые на отдельных частотах превышают уровень широкополосного шума от буксира “Smit Sakhalin”. Например, уровень тонального сигнала с частотой ≈ 300 Гц достигает 125 дБ отн. $1 \text{ мкПа}^2/\text{Гц}$ и соответственно на 25 дБ превышает уровень широкополосного шума от буксира “Smit Sakhalin”. Расчеты соответствующих значений SPL_{rms}^{exp} (18–3000 Гц) показали: “Smit Sakhalin” – 135.5 дБ, “Pacific Endurance” – 131 дБ. Следовательно, при существенных различиях в уровнях широкополосных шумов из-за интенсивных тональных компонент интегральные уровни шума отличаются только на 4.5 дБ, однако водоизмещение у буксира “Pacific Endurance” на 2300 тонн больше, чем у “Smit Sakhalin”.

Спектры, представленные на рис. 7, характеризуют антропогенные шумы на границе – точка ПА-Б-20 прибрежного Пильтунского района кормления серых китов (см. рис. 1), генерируемые данными буксирами, работающими возле платформы “ПА-Б” в режиме ДР. Как видно, уровни широкополосных шумов от буксира “Pacific Endurance” и в этом режиме в данной точке акустических измерений ниже, чем от буксира “Smit Sakhalin”, причем на частотах меньше 160 Гц они не превышают уровни “фоновых” шумов, обусловленных стационарными антропогенными шумами от платформы “ПА-Б” (см. график 3 на рис. 7). Поэтому для сравнения расчеты соответствующих значений SPL_{rms}^{exp} (160–3000 Гц) проведены в частотном диапазоне 160–3000 Гц: “Smit Sakhalin” – 119.7 дБ, “Pacific Endurance” – 107.8 дБ, “Фон” – 94 дБ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Экспериментально проверена методика построения оценок спектров антропогенных шумов, формируемых в прибрежном Пильтунском районе летне-осеннего нагула серых китов судами, обеспечивающими работу газо-нефтедобывающих платформ “ПА-Б” и “Моликпак”. На примере буксира “Smit Sakhalin” показано, как на основе акустических измерений, проведенных на траверзе 600 м от траектории типового движения буксира около платформы, и результатов предварительных экспериментально-теоретических исследований с помощью численного моделирования строится спектр эквивалентного судну точечного источника, который может быть пересчитан в район кормления китов. Сравнение модельных и экспериментальных спектров в точке, удаленной от платформы “Моликпак” на 9 км, показало разницу в соответствующих значениях SPL_{rms} (18–3000 Гц), равную 1 дБ.

Синхронные измерения акустических шумов, проведенные в нескольких точках на шельфе во время движения около платформы “Моликпак” двух буксиров разного типа, а также во время их работы в режиме ДР с платформой “ПА-Б”, показали, что буксиры генерируют более интенсивные на ≈ 10 дБ и широкополосные антропогенные шумы, чем во время равномерного движения. Буксир дизель-электроход “Pacific Endurance” имеет водоизмещение на 2300 тонн больше, чем “Smit Sakhalin”, но в обоих режимах он генерировал антропогенные шумы, уровень которых в диапазоне 18–3000 Гц меньше на 4.5 дБ, а в диапазоне 160–3000 Гц – на

12 дБ. Поскольку суда типа “Pacific Endurance” с электро-двигателями являются малозумящими, то можно их рекомендовать для работы на шельфе.

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: Алексея Владимировича – Coordinator of Marine Mammals Programs Sakhalin Energy Investment Company, Ltd. и Roberto Racca – since JASCO Research Company Компании “Эксон Нефтегаз Лимитед”. Благодарим также сотрудников ТОИ ДВО РАН Д.Г. Ковзель, С.В. Борисова, В.А. Гриценко и М.Ю. Фершалова, принявших участие в полевых исследованиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блохин С.А., Язвенко С.Б., Владимиров В.Л., Лагерева 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. / Докл. на конференции “Морские млекопитающие в удаленных районах Арктики”, 11–13 сентября 2002 г., оз. Байкал, Россия.
2. Тюрнева О.Ю., Маминаев 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-й междунар. конф.: СПб Университета, 2006. С. 530–535.
3. Владимиров В.А., Стародымов С.П., Афанасьев-Григорьев А.Г., Корниченко 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. Рутенко А.Н., Гриценко В.А. Мониторинг антропогенных акустических шумов на шельфе о. Сахалин // Акустический журнал. 2010. Т. 56. № 1. С. 77–81.
5. Рутенко А.Н., Боровой Д.И., Гриценко В.А., Петров П.С., Ущиповский В.Г., Вокхольт М. Акустический мониторинг и результаты исследований распространения в прибрежную зону энергии сейсмических импульсов // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 3. С. 356–369.
6. Рутенко А.Н., Гаврилевский А.В., Ковзель Д.Г., Коротченко Р.А., Путов В.Ф., Соловьев А.А. Мониторинг параметров сейсмоакустических импульсов и антропогенных шумов на шельфе о. Сахалин // Акуст. журн. 2012. Т. 58. № 2. С. 248–257.
7. 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.
8. 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 / Докл. XI школы-семинара Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2006. С. 340–343.
9. Рутенко А.Н., Соловьев А.А., Ущиповский В.Г., Jenkerson M.R. Построение оценок спектра антропогенных шумов на основе предварительных экспериментальных и теоретических исследований / Докл. XIV школы-семинара им. акад. Л.М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2013. С. 223–226.
10. 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 / Proc. of Acoustics. 2012. 21–23 November 2012, Fremantle, Australia.
11. Collins M.D. A split-step Padé solution for the parabolic equation method // J. Acoust. Soc. Am. 1993. V. 93. P. 1736–1742.
12. Jensen F.B., Kuperman W.A., Porter M.B., Schmidt H. Computational ocean acoustics. New York: AIP press. 1994. 612 p.
13. Тюрнева О.Ю., Яковлев Ю.М., Томбах Райт К., Мейер С.К. Серые киты охотско-корейской популяции у берегов острова Сахалин. Владивосток: Дальнаука, 2013. 244 с.
14. Демченко Н.Л., Фадеев В.И. Состав и распределение амфипод у северо-восточного побережья о. Сахалин (Охотское море) // Изв. ТИНРО. Сб. науч. трудов. Владивосток. 2011. Т. 166. С. 244–254.
15. Борисов С.В., Гриценко В.А., Ковзель Д.Г., Лихачев В.В., Коротченко Р.А., Круглов В.М., Пенкин С.И., Рутенко А.Н. Аппаратурный комплекс для акустико-гидрофизических исследований на шельфе и результаты его применения в натуральных экспериментах // Вестн. ДВО РАН. 2003. № 2. С. 16–29.
16. Bahtiarian M.A. ASA standard goes underwater // Acoust. Today. 2009. V. 5. № 4. P. 26–29.
17. 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.