

УДК 574.2:639.2.065–181.4

М.Ю. Кузнецов, В.И. Шевцов, В.И. Поляничко*Тихоокеанский научно-исследовательский рыбохозяйственный центр,
690091, г. Владивосток, пер. Шевченко, 4**ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО ШУМА
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ СУДОВ ТИНРО-ЦЕНТРА**

Основой статьи послужили результаты измерения гидроакустического шума двух научно-исследовательских судов ТИНРО-центра типа СТМ проекта «Атлантик-833»: НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский», выполняющих тралово-акустические съемки биологических ресурсов в дальневосточных морях. Описаны инструментальные средства сбора и обработки данных и методика проведения измерений подводного шума этих судов при их прохождении измерительными галсами мимо калиброванной гидрофонной системы. Приводятся диаграммы пространственного распределения, амплитудно-временные и спектрально-энергетические характеристики шума, их сравнение с рекомендуемыми ИКЕС и с аналогичными характеристиками других судов. Максимальный уровень шума зарегистрирован вблизи траверса судов. Наблюдается интерференция звука в приповерхностном слое в пограничных с траверсом зонах галсов. Характеристика направленности шумового поля на частотах между 600 и 2000 Гц в приповерхностном слое имеет классическую форму «бабочки». Спектр шума сосредоточен в полосе частот ниже 2000 Гц с концентрацией энергии до 500 Гц и тенденцией спада спектральной плотности 3 дБ/октаву на частотах свыше 200 Гц. Шумы обоих судов в 1/3-октавных полосах частот превышают рекомендуемый ИКЕС уровень для научно-исследовательских судов, ведущих учет численности рыб, на 20–22 дБ в диапазоне частот ниже 200 Гц и на 10 дБ на частотах выше 500 Гц. В диапазоне частот максимальной слуховой чувствительности рыб НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский» по уровню излучаемого шума занимают промежуточное положение между судном типа РТМС проекта «Прометей» и НИС «Миллер Фримен» (США) и превышают шум НИС «Оскар Дайсон» (США) с дизель-электрическим приводом на 18–24 дБ (полоса 1 Гц). Оценены дистанции реагирования массовых видов промысловых рыб на шумовые поля. Суда ТИНРО-центра имеют вторую после РТМС зону реакции на них трески и минтая, а НИС «Миллер Фримен» — второй по дистанции избегания его тихоокеанской сельдью. Расстояния реагирования лососей на шумы НИС ТИНРО-центра не превышают рекомендованные ИКЕС 20 м во всем диапазоне частот.

Ключевые слова: поведение рыб, реакция избегания, шум судна, спектр шума, гидрофон, гидроакустическое поле, уровень звукового давления шума, диаграмма направленности, полоса частот, оценка запасов рыб.

Kuznetsov M.Y., Shevtsov V.I., Poljanichko V.I. Underwater noise characteristics of TINRO-Center's research vessels // *Izv. TINRO.* — 2014. — Vol. 177. — P. 235–256.

Underwater noise radiated by two medium-tonnage research vessels of Pacific Fish. Res. Center (TINRO) belonged to the same project «Atlantic-833» (RV TINRO and Profes-

* Кузнецов Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией, e-mail: kuznetsovm@tinro.ru; Шевцов Василий Игнатьевич, ведущий инженер, e-mail: tinro@tinro.ru; Поляничко Владимир Ильич, инженер, e-mail: tinro@tinro.ru.

Kuznetsov Michail Yu., Ph.D., head of laboratory, e-mail: kuznetsovm@tinro.ru; Shevtsov Vasilii I., leading engineer, e-mail: tinro@tinro.ru; Poljanichko Vladimir I., engineer, e-mail: tinro@tinro.ru.

sor Kaganovsky) is measured by a calibrated hydrophone system. Tools and methods of the noise measurement and methods of the data processing are described in details. Diagrams of the noise spatial distribution, its amplitude-time and spectral-power parameters are presented and compared with those recommended by ICES for fishery research vessels and with similar parameters of other vessels. The maximum noise level is registered abeam of the vessels; the sound interference is observed at the sea surface in the beam vicinity. The noise spectrum is limited by the frequency 2000 Hz with high power in the band < 500 Hz; the spectral power decreases by 3 dB per octave for the frequencies > 200 Hz. The noise field at the sea surface has a classic «butterfly» shape for the frequency range 600–2000 Hz. The noise in 1/3-octave bands exceeds the level recommended by ICES for research vessels on 20–22 dB for the frequencies < 200 Hz and on 10 dB for the frequencies > 500 Hz, it exceeds the noise of diesel-electric RV Oscar Dyson (USA) on 18–24 dB for the frequencies < 1000 Hz and is similar to noise of factory trawler Prometey (USSR) and RV Miller Freeman (USA) for the frequencies most sensitive for fish. Distance of fish reaction to the sonar noise is determined for mass commercial species: it is the largest among research vessels for cod and pollock but is shorter than that one for RV Miller Freeman for herring (commercial trawler Prometey has the largest distance for all these species). For salmon, the distance of their reaction to sonar noise of TINRO' vessels does not exceed that one recommended by ICES (20 m).

Key words: fish behaviour, avoiding reaction, vessel noise, noise spectrum, hydrophone, underwater acoustic field, sound pressure, noise level, noise field, frequency band, fish stock estimation.

Введение

С развитием инструментальных методов и средств дистанционного акустического зондирования водной среды и компьютерных технологий обработки гидроакустической информации выявляются все новые данные об особенностях двигательного поведения гидробионтов и их реакций на внешние раздражители, которые ранее из-за недостатка этих сведений подвергались сомнению и не принимались во внимание при организации учетных работ. В настоящее время экспериментально доказано, что шум судна, выполняющего тралово-акустическую съемку, может оказывать существенное влияние на поведение рыб и, как следствие, на траловые и эхоинтеграционные оценки запасов (Mitson, 1995; Коротков, 1998; Vabø et al., 2002; De Robertis, Wilson, 2006, 2010; Ona et al., 2007; Кузнецов, Вологдин, 2009; De Robertis et al., 2010; Кузнецов, 2011; De Robertis, Handegard, 2013). Это влияние выражается реакцией избегания, т.е. стремлением рыб выйти из шумового поля судна в сторону его уменьшения (минимизации стимула). Избегательная реакция сопровождается горизонтальными и вертикальными движениями рыб. Эти движения вызывают изменение естественного пространственного распределения и плотности скопления рыб на пути судна, а наклон рыб при погружении является причиной уменьшения отражательной способности (силы обратного рассеяния) скопления и занижения эхоинтеграционных оценок (McQuinn, 1999; Ona et al., 2007). Сила реакции и дистанция реагирования рыб на шум судна по данным различных исследователей существенно варьируют в зависимости от уровня шума, вида (слуховых способностей) объекта и его физиологического состояния (Кузнецов, Вологдин, 2009). По результатам анализа зависимости слуховых порогов рыб от частоты звука и спектрально-энергетических характеристик судового шума дистанции реагирования некоторых видов промысловых рыб (например, тресковых и сельдевых) могут составлять 500 м и более. Максимальные дистанции реагирования у рыб на более шумные суда и наименьшие — на суда с низким уровнем гидроакустического шума (Кузнецов, 2011).

Таким образом, для проведения съемок и оценки запасов рыб желательно использовать суда с низким уровнем гидроакустического шума. На основе результатов экспериментальных исследований были выработаны рекомендации ИКЕС (Международный совет по исследованию моря — ICES), согласно которым уровень шума рыболовных научно-исследовательских судов на частотах ниже 10 кГц не должен превышать порог восприятия рыбами шума на расстоянии 20 м (Mitson, 1995). Оценены дистанции реагирования различных видов рыб на гидроакустические шумы различных типов судов и допустимые пределы уровня подводного шума (Кузнецов, 2011). С учетом рекомендаций

ИКЕС по шуму в настоящее время уже построено свыше 30 научно-исследовательских судов нового поколения, использующих для снижения шума электродвижение, фиксированный шаг гребного винта и другие новшества (Левашов, 2010). В России пока эксплуатируются в основном научно-исследовательские суда старого поколения, построенные на основе проектов промысловых судов, которые имеют уровни гидроакустического шума, значительно превышающие рекомендованные ИКЕС (Кузнецов, Вологдин, 2009; Левашов, 2010).

Характеристики шума, излучаемого судном, должны регулярно контролироваться и быть одним из критериев оценки его пригодности для ресурсных исследований. Практически все НИС Европы и США проходят акустическую аттестацию и получают так называемые «акустические паспорта» на их соответствие требованиям ИКЕС (Левашов, 2010). В ТИНРО-центре для исследований биологических ресурсов в Беринговом и Охотском морях тралово-акустическим методом, как правило, используются два судна проекта «Атлантик-833» типа СТМ — НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский», шумы которых никогда не измерялись.

Цель данной работы — исследовать характеристики гидроакустического поля научно-исследовательских судов ТИНРО-центра, выполняющих тралово-акустические съемки в дальневосточных морях, сравнить их с рекомендуемыми ИКЕС и с аналогичными характеристиками других судов и оценить дистанции реагирования промысловых видов рыб на шум этих судов.

Материалы и методы

При планировании работы была разработана методика измерений гидроакустического шума научно-исследовательских судов ТИНРО-центра. Методика составлена на основе Госстандарта РФ*, литературных данных (Урик, 1978; Кузнецов и др., 1979; Кузнецов, Кузнецов, 2007) и стандарта ANSI/ASA**, регламентирующих термины и определения в области гидроакустических измерений, а также порядок проведения и представления результатов измерений подводного шума.

В методике использован известный способ измерений подводного шума, основанный на том, что звук, излучаемый движущимся в водной среде объектом, принимается приемником, помещаемым на некотором установленном расстоянии от трассы движения объекта, а затем анализируется его спектрально-энергетический состав во время прохода объекта вблизи приемника (Урик, 1978; Тукиянен и др., 2005). Измеряемым параметром будут уровни звукового давления в стандартных (октавных, 1/3-октавных) частотных полосах при экспресс-контроле, а также в узких частотных полосах для определения причин превышения норм и выявления источников повышенного шума при постпроцессорной обработке. Измерения уровней подводного звукового давления выполняются в дальнем акустическом поле судна и затем приводятся к расстоянию 1 м. Уровни дискретных составляющих звукового давления шума представляются в децибелах относительно опорного давления звука 1 мкПа. Полученные таким образом результаты не только характеризуют уровни подводного шума судна при различных режимах работы двигателя, но и позволяют оценить качество его проектирования и строительства в целом, а также служат показателем поддержания шумовых характеристик судна на прежнем уровне.

Для измерений использовались следующие основные инструментальные средства.

1. Гидрофонная измерительная система (ГИС). Предназначена для измерения уровней подводного шума и обеспечивает преобразование гидроакустического сигнала, действующего в точке расположения приемника, в электрический сигнал и передачу его аппаратуре обработки. В состав ГИС входят два калиброванных измерительных гидро-

* Рекомендации по метрологии Р 50.2.037-2004 : Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения гидроакустические. Термины и определения. М., 2004. 32 с.

** Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships — Part I: General Requirements : American National Standard ANSI/ASA. N.Y., 2009. 22 p.

фона с кабелем CR1 (© Cetacean Research Technology) и прецизионный двухканальный компьютерный интерфейс (Precision Dynamic Signal Acquisition Interface) ST219-DAQ USB. Измерительный гидрофон — калиброванный ненаправленный электроакустический преобразователь, используемый для преобразования измеряемого акустического давления в воде в электрический сигнал. Компьютерный интерфейс предназначен для согласования и усиления (при необходимости) аналогового сигнала от гидрофонов, его оцифровки и передачи в компьютер по двум независимым каналам.

Технические характеристики ГИС приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики ГИС

Table 1

Characteristics of hydrophone system

Параметр	Значение
Гидрофон CR1	
Линейный частотный диапазон (± 2 дБ), кГц	0,02–25
Рабочий диапазон частот (+3/–20 дБ), кГц	0,005–48
Длина кабеля, м	15; 50
Уровень чувствительности, дБ отн. 1 В/мкПа	–199
Собств. шум на 1 кГц, дБ отн. 1 мкПа	38
Максимальная глубина погружения, м	100
Диапазон рабочих температур, °С	От –25 до +60
Емкостное сопротивление, нФ	8,92 (15 м); 13,23 (50 м)
Характеристика направленности	Ненаправленный ниже 10 кГц
Интерфейс ST219-DAQ USB	
Число каналов	2 (независимых)
Аналогово-цифровой преобразователь	24-разрядный
Частотная характеристика, Гц	0,07–24000
Точность измерения амплитуды, дБ	0,05
Отношение сигнал/шум, дБ	> 100 (< 0,01 %)
Частота дискретизации, кГц	4–48
Ступенчатая регулировка усиления, дБ	–20; 0; +20; +40
Входное сопротивление, кОм	100

2. Система сбора, записи, обработки и визуализации данных. Система обеспечивает сбор и накопление акустических данных от гидрофонов с возможностью их визуализации и постпроцессинговой обработки. Согласно требованиям стандарта ANSI/ASA* система сбора данных должна иметь частоту дискретизации не менее 48 кГц, отвечающую критерию Найквиста (Котельникова), и динамический диапазон не менее 100 дБ. В качестве такой системы использовался программный анализатор спектра, реализующий алгоритм быстрого преобразования Фурье (FFT Spectral Analysis System) SpectraPLUS (© Pioneer Hill Software LLC, 1993-2008). Программа позволяет осуществлять запись (накопление), спектральный анализ в реальном масштабе времени, воспроизведение и постпроцессорную обработку звуковых сигналов, поступающих с ГИС по двум каналам. Она поддерживает быстрое преобразование Фурье размером до 65536, цифровую фильтрацию, набор окон сглаживания, изменение частоты выборки, узкополосное или октавное (1/1, 1/3, 1/6, 1/9, 1/12) масштабирование, а данные демонстрирует в виде временного ряд ГИС, амплитудного и фазового спектра, трехмерного поверхностного графика и спектрограммы.

3. Средства измерения дистанции. Измерение дистанции требуется, чтобы определить горизонтальное расстояние между акустическим центром судна и местом на морской поверхности выше гидрофонов для приведения уровней звукового давления шума судна к расстоянию 1 м в любой момент времени от начала до конца галса. Дистанции между ГИС и судном и параметры движения судна в каждой точке галса

* Quantities and Procedures ..., 2009.

рассчитывались с использованием навигационной системы спутникового позиционирования GPS (точность определения координат до 2 м, интервал выходных телеграмм 1 с) и специально разработанной программы, с помощью которой производилось считывание данных с приемника GPS и расчет скорости движения судна и курсового угла. Приемники GPS были установлены как на судне — объекте измерений, так и на вспомогательном судне, с которого производились акустические измерения шума.

Основные требования к условиям выполнения и точности измерений представлены в табл. 2. Гидрофоны размещаются в толще воды вертикально на глубинах, которые получаются из номинальных углов 15° и 45° от морской поверхности на минимальной дистанции до судна (рис. 1). На выбранном расстоянии до судна в точке максимального приближения (ТМП) 50 м глубина расположения гидрофонов составила $H1 = 15$ м и $H2 = 50$ м.

Таблица 2

Условия проведения измерений

Table 2

Measurement requirements

Параметр	Значение
Точность измерения шума	$\pm 2,0$ дБ
Полоса анализа	1 Гц, 1/3 октавы
Частотный диапазон (полоса 1/3 октавы)	10–20000 Гц
Дистанция до судна в ТМП	50 м или 1 длина судна
Номинальная глубина гидрофонов	15 м (15°), 50 м (45°)
Точность измерения дистанции	≤ 2 м
Минимальная глубина дна	> 100 м
Угол окна выборки данных	$\pm 45^\circ$
Время усреднения в пределах $D_{\text{выб}}$	1 с
Минимальное число галсов	6 (3 левый борт, 3 правый борт)
Отношение сигнал/фон. шум	≥ 3 дБ
Рекомендуемые погодные условия	Скорость ветра ≤ 10 уз
Калибровка гидрофонов	Каждые 12 мес

Примечание. ТМП — точка максимального приближения, $D_{\text{выб}}$ — окно выборки данных.

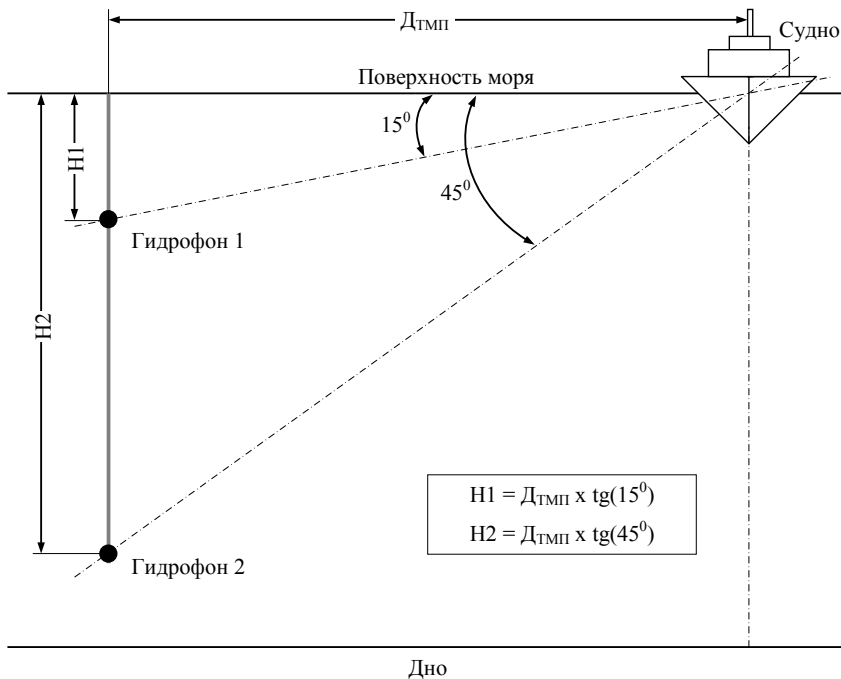


Рис. 1. Вертикальное расположение гидрофонов в точке максимального приближения (ТМП) на траверсе судна: $D_{\text{ТМП}}$ — дистанция до судна в ТМП

Fig. 1. Vertical arrangement of hydrophones abeam a vessel. $D_{\text{ТМП}}$ — beam distance to vessel

Гидрофоны устанавливали на заданную глубину со вспомогательного судна (мотобота) при помощи буйа и подвешенного к нему на тросе груза. Кабель гидрофона крепился к тросу без нагрузки. Для исключения вертикальных движений гидрофона и рывков кабеля при волнении моря между тросом и буйем предусмотрена развязка в виде резинового пружинного подвеса (рис. 2).



Рис. 2. Схема установки гидрофонов
Fig. 2. Scheme of hydrophones installation

Измерение уровней звукового давления шума, излучаемого судном, производилось согласно требованиям стандарта ANSI/ASA* при его прохождении мимо ГИС галсами (участок прямолинейного равномерного движения судна, на котором проводятся акустические измерения, является измерительным галсом) поочередно левым и правым бортами (рис. 3). В точке «Старт» судно должно достигнуть требуемые параметры движения и поддерживать постоянную скорость, фиксированные установки гребного винта регулируемого шага (ВРШ) и обороты двигателя и минимальное использование рулевого управления для удержания на заданном курсе, пока судно не пройдет через точку «Финиш». После этого судно выполняет циркуляцию и выходит на следующий галс (в точку «Старт») другим бортом. Расстояние от вспомогательного судна с ГИС до точки «Старт» составляло не менее 0,5 мили. Скорость судов во время измерений была постоянной — 9,5 уз (скорость судна во время эхосъемки), ВРШ — 14–15, винт — 203 об./мин, главный двигатель — 1000 об./мин.

Сигнал от каждого гидрофона во время измерительного галса записывался одновременно по двум каналам. Данные с GPS на основном и вспомогательном судне, отметки о начале и окончании галса и акустические измерения были синхронизированы во времени, чтобы иметь возможность реконструировать измерительный галс и взаимное положение судов в процессе обработки данных. Перед выполнением галсов и по окончании работ выполнялись измерения и запись фонового шума одновременно по обоим каналам (усреднение 30 с), когда судно находилось не менее чем в 2 км от ГИС.

Далее выполнялась процедура обработки результатов измерений и приведения звукового давления шума на различных дистанциях к опорному расстоянию 1 м с учетом чувствительности гидрофона и усиления аналогово-цифрового преобразователя. Расстояние от судна до гидрофонов вычисляется по горизонтальной составляющей —

* Quantities and Procedures ..., 2009.

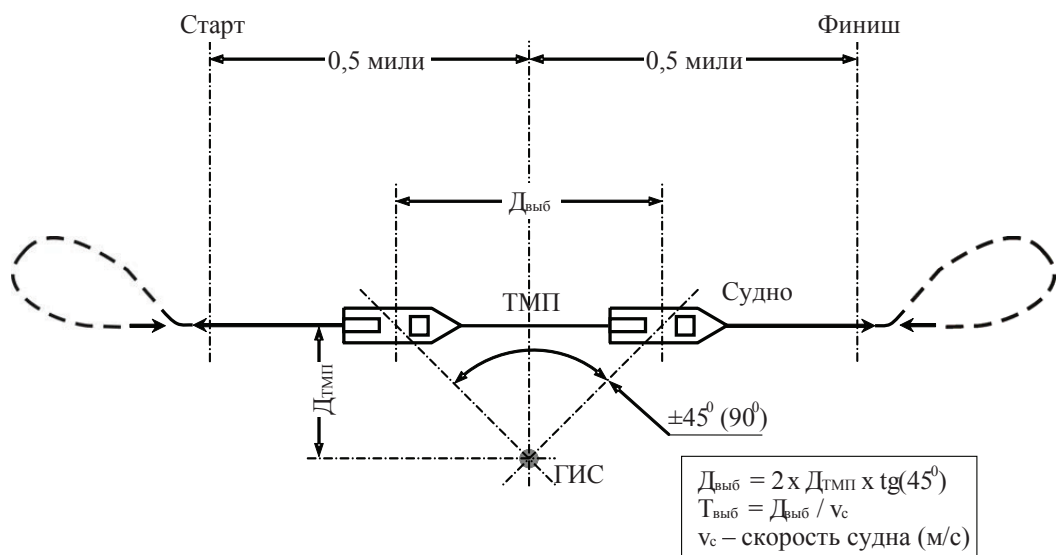


Рис. 3. Схема измерения подводного шума судна ($D_{\text{выб}}$ — окно выборки данных, $D_{\text{ГМП}}$ — дистанция до судна в точке максимального приближения, $T_{\text{выб}}$ — время выборки данных)

Fig. 3. Scheme of underwater noise measurement ($D_{\text{выб}}$ — data sample window, $D_{\text{ГМП}}$ — beam distance to vessel, $T_{\text{выб}}$ — time of data sampling)

дистанция от акустического центра судна до буя (вспомогательного судна) — и вертикальной составляющей — дистанция от морской поверхности до каждого гидрофона.

Приведенный уровень звукового давления шума, создаваемого судном на опорной дистанции 1 м, вычислялся согласно уравнению гидролокации, описывающему сферическое распространение звука в воде (Клей, Медвин, 1980):

$$\text{УШ}_0 = \text{УШ}_д + 20\log(D_1/D_0) + \alpha D_1, \quad (1)$$

где $\text{УШ}_д$ — измеренный гидрофоном уровень подводного звукового давления шума, дБ; D_1 — дистанция от судна до каждого гидрофона на галсе, м; D_0 — опорная дистанция (1 м); α — коэффициент затухания, дБ/м.

Второй член в уравнении (1) компенсирует потери на расхождение (расширение фронта волны) при сферическом распространении, третий — потери на затухание, обусловленные поглощением звука в воде по мере удаления от источника. На частотах ниже 10 кГц и расстояниях до 1 км поглощение звука не превышает 1 дБ (Клей, Медвин, 1980), поэтому при пересчете уровней шума им можно пренебречь. Кроме того, на этих расстояниях не учитывались эффекты интерференции, связанные с отражением от граничных слоев, и влияние неоднородности морской среды, а также направленность гидроакустического поля судна. Полученные данные сравнивались с рекомендуемыми ИКЕС уровнями шума (Mitson, 1995) и с шумами других судов.

Реальное акустическое поле судна обладает направленностью. Характеристика направленности акустического поля судна может быть получена только экспериментальным путем. Рассчитать ее невозможно, так как судно имеет несколько источников шума с различными спектрами излучения и не может рассматриваться как монопольный или дипольный излучатель. Для интегрального уровня звукового давления и отдельных дискретных составляющих шума по результатам измерений строились диаграммы направленности (линии равной интенсивности) гидроакустического поля судна.

Результаты и их обсуждение

Воспринимаемые параметры звуковой волны

Большинство видов рыб обладают развитой и хорошо адаптированной к морской среде слуховой системой, позволяющей им воспринимать звуковые колебания и

определять направление на их источник в широкой полосе частот и на значительных расстояниях (Протасов, 1965, 1978; Hawkins, 1981; Сорокин, 1984; Popper et al., 2003; Kasumyan, 2005; Кузнецов, 2011). Восприятие акустических колебаний у рыб обеспечивается структурами внутреннего уха (лабиринта) и органов боковой линии (Протасов, 1978; Sand, 1981; Кузнецов, Кузнецов, 2007). Слуховыми рецепторами внутреннего уха рыб являются отолитовые органы и чувствительные волосковые клетки, представляющие собой окончания слухового нерва. В звуковой волне стригущие движения отолитов создают изгиб волосковых клеток, вызывающий электрический ответ (Kasumyan, 2005). Таким образом, эти сенсорные клетки могут стимулироваться только кинетическими компонентами звуковой волны: смещением частиц среды или его производными — скоростью или ускорением (Lewis, 1984; Sand, Karlsen, 1986; Kalmijn, 1988). Органы чувств боковой линии — невромасты — по своей структуре занимают промежуточное положение между лабиринтом и кожей и представляют собой комплекс чувствительных клеток с волосками на конце (Протасов, 1978; Sand, 1981). Адекватный стимул для чувствительных клеток боковой линии — смещение частиц среды (Kuiper, 1967).

Следует отметить, что смещение (скорость, ускорение) частиц среды и звуковое давление — это неразделимые компоненты одного и того же акустического поля. В плоской бегущей звуковой волне (поле сферической волны на большом расстоянии от источника) давление p связано со скоростью смещения частиц жидкости и соотношением (Урик, 1978)

$$p = \rho c \cdot u. \quad (2)$$

Данное выражение представляет собой закон Ома в акустике: колебательная скорость частиц является акустическим аналогом электрического тока, а давление p — аналогом электрического напряжения. Коэффициент пропорциональности ρc — волновое (акустическое) сопротивление среды, где ρ — плотность жидкости; c — скорость распространения звуковой волны.

Согласно общей теории акустики, в ближнем акустическом поле источника амплитуда звукового давления (волны давления) убывает, как плотность активного потока мощности, обратно пропорционально квадрату расстояния, — $1/r^2$ (Исакович, 1973). Амплитуда смещения убывает быстрее, как плотность реактивного потока мощности, — $1/r^3$. Поэтому измерять звуковое поле в ближней зоне источника методически неверно. Измерения звукового давления выполняются в дальнем акустическом поле и затем приводятся к расстоянию 1 м. В дальнем акустическом поле потери на расхождение (расширение фронта) волны давления и волны смещения обратно пропорционально расстоянию от источника — $1/r$. Таким образом, звуковое поле источника в каждой точке пространства составляют одновременно, но с разной интенсивностью, волны давления (скалярная характеристика звука) и волны смещения (векторная характеристика звука).

Принято считать, что боковая линия играет важную роль в определении местоположения (локализации) источника в ближней (неволновой) зоне, поскольку смещения частиц в этой зоне имеют максимальную амплитуду (Протасов, 1978). Внутреннее ухо позволяет воспринимать звуковые колебания в более широкой полосе частот и на больших расстояниях. Этому способствуют находящиеся вблизи лабиринта или связанные с ним с помощью специализированных морфологических структур воздушные полости, в частности плавательный пузырь рыб. За счет разницы волнового сопротивления двух сред звуковое давление вызывает периодические изменения объема и пульсации стенок пузыря, которые передаются рецепторам внутреннего уха. Таким образом расширяется диапазон воспринимаемых частот и повышается общая чувствительность рыб к звуку (Sand, Hawkins, 1973; Vlastek, 1981). В дальнем акустическом поле воздействие звуковой волны на лабиринт в основном опосредованное через воздушные полости, а в ближней зоне источника — и прямое (волны смещения) и опосредованное (волны давления) (Kasumyan, 2005).

Об источниках гидроакустического шума судна

Основными источниками подводного шума судов являются главные судовые двигатели, гребные винты и турбулентные потоки (Johanneson, Mitson, 1983). Каждый из

этих источников вносит свой вклад в формирование гидроакустического поля судна, воздействующего на слуховые рецепторы рыб.

Шум судовых двигателей и редуктора через фундаменты и элементы механизмов, имеющие соединение с корпусом судна, передается в воду и распространяется в ней на значительные расстояния. При этом вибрации корпуса судна нельзя рассматривать как колебание единого тела, поскольку отдельные его части генерируют ряд дискретных составляющих от находящихся вблизи отдельных источников на различных частотах с различными амплитудами и могут рассматриваться как системы с распределенными параметрами. Такие системы имеют несколько собственных частот, поэтому их спектр широкополосный (Урик, 1978).

Шум винта создается вне корпуса судна. Вращение гребного винта — преобладающий источник шума ниже 100 Гц. Частота ряда дискретных составляющих шума определяется частотой вращения лопастей винта, равной частоте вращения вала, умноженной на число лопастей. При определенной частоте вращения винта, которая называется критической, на отдельных участках его лопастей давление воды падает ниже гидростатического и в жидкости образуются полости (пустоты), которые заполняются растворенным в воде воздухом, превращаясь в пузырьки различных размеров и концентрации. Попадая в область повышенного давления, пузырьки резко схлопываются, что сопровождается интенсивным шумообразованием (Изак, Гомзиков, 1987). Шум представляет собой громкое «шипение» в широком спектре частот с максимумом в диапазоне 100–1000 Гц (Урик, 1978). Увеличение числа лопастей винта уменьшает давление на лопасти и соответственно риск возникновения кавитации (процесс образования разрывов сплошности среды при вращении гребного винта, характеризующийся появлением в жидкости парогазовых пузырьков различных размеров и концентрации, от англ. cavity). Однако эффективность работы гребного винта при этом также снижается. Наиболее удовлетворительный результат для большинства судов получен при использовании винта из 5 лопастей. В последние годы с целью снижения шума на судах трехлопастные винты заменяют на 4- и 5-лопастные. Кавитационные явления уменьшаются при увеличении размеров винта и снижении частоты его вращения, так как уменьшается турбулентность потока воды (Урик, 1978).

Другой существенный источник низкочастотного шума судна (низкие звуковые частоты) — турбулентный шум, обусловленный пульсациями скорости и давления в турбулентном потоке при обтекании корпуса судна (Петровский, 1966). С увеличением скорости обтекания интенсивность турбулентного шума существенно возрастает, кроме того, он суммируется с кавитационным.

Характеристики гидроакустического поля судов

В соответствии с вышеизложенной методикой получены спектральные и временные характеристики подводного шума двух НИС типа «Атлантик» (проект 833), используемых при проведении ресурсных исследований в ТИПРО-центре.

Характеристики записи фонового шума в районе измерений представлены на рис. 4. Амплитудно-временная диаграмма фона нестабильна, содержит аперiodические колебания среднего уровня на 5–6 дБ на глубине 50 м и 3–5 дБ на глубине 15 м и выбросы до 15 дБ (рис. 4, А). Наблюдаются квазипериодические изменения уровня шума с периодом повторения 3–4 с, характерные для признака «качка». Спектр несущих частот окружающего (фонового) шума с плавно спадающей амплитудой достаточно стабильный, содержит повышенный уровень шума на частотах ниже 500 Гц и дискретные составляющие в диапазоне от 600 до 1500 Гц (рис. 4, Б, В).

Амплитудно-временная диаграмма шума судна (рис. 5) представляет собой график изменения уровня звукового давления сигнала, измеряемого гидрофонами в точке регистрации при движении судна по галсу. Данный график демонстрирует проходную характеристику шумового поля судна на галсе (проходная характеристика — временная зависимость уровня звукового давления, измеряемого в заданной полосе частот, при равномерном прямолинейном движении корабля относительно неподвижного измери-

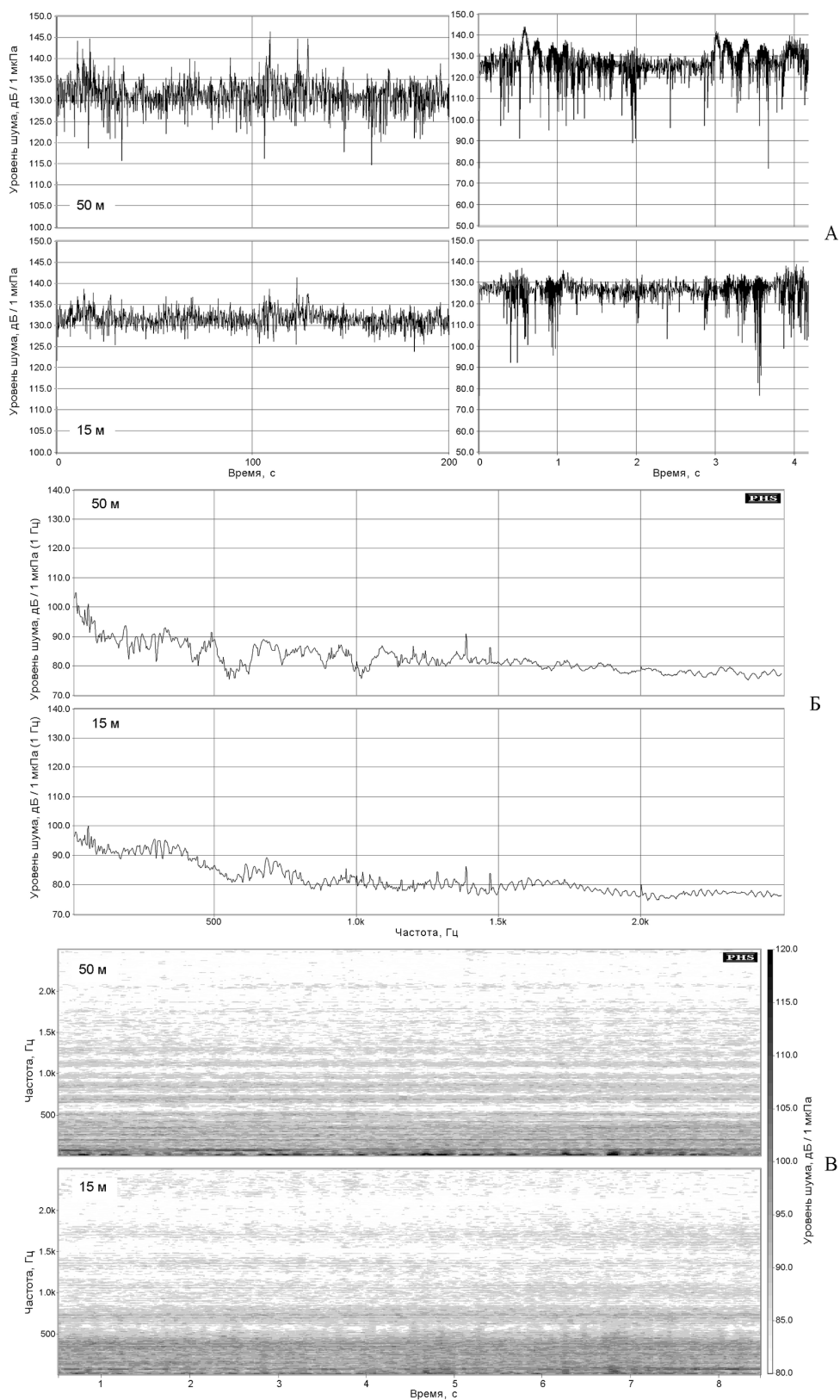


Рис. 4. Характеристики фонового шума в месте регистрации: **А** — амплитудно-временная диаграмма, **Б** — спектр несущих частот, **В** — сонограмма спектра несущих частот

Fig. 4. Parameters of background noise in the site of measurements: **A** — amplitude-time diagram, **Б** — carrier frequencies spectrum, **В** — sonogram of the carrier frequencies spectrum

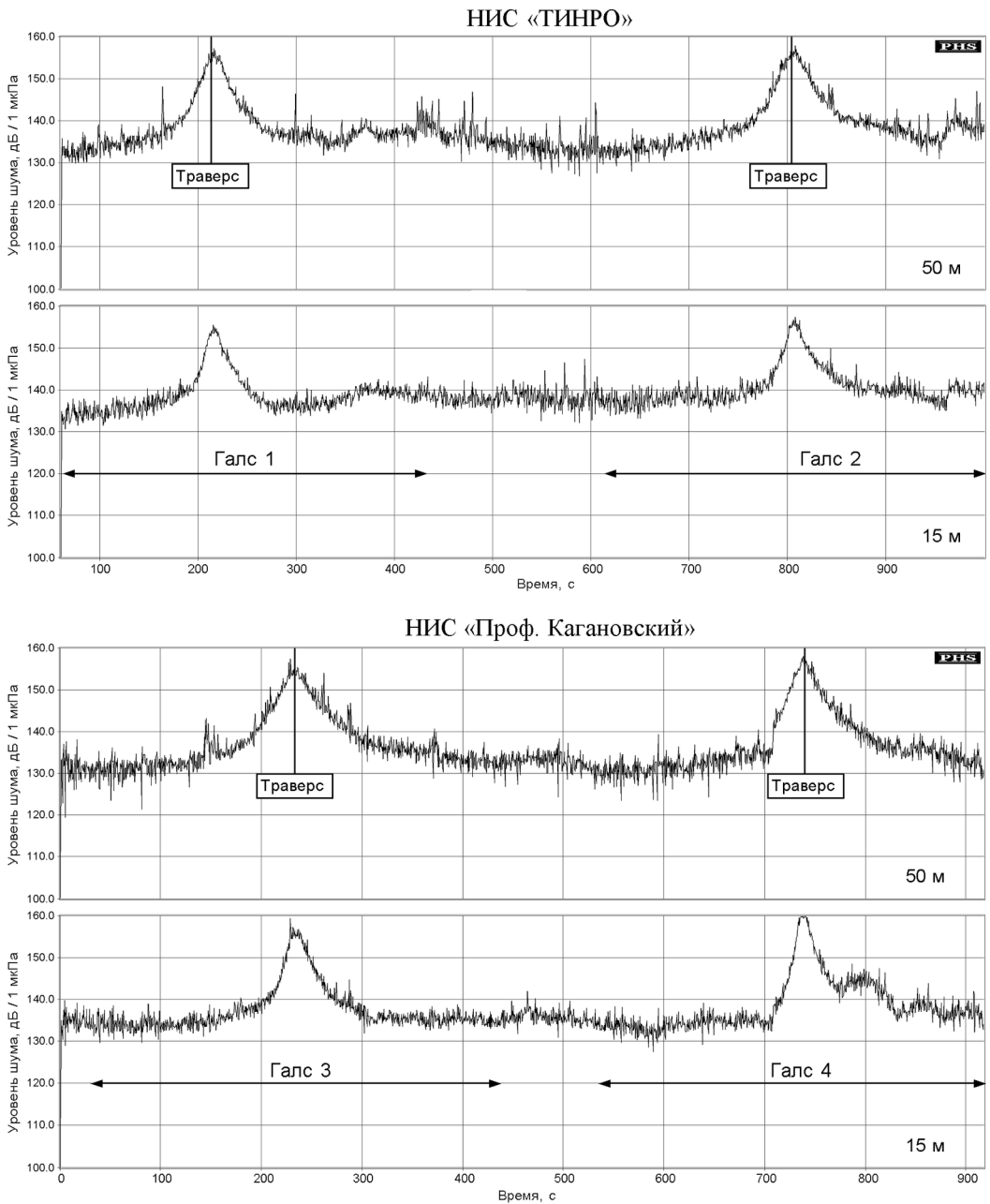


Рис. 5. Амплитудно-временные диаграммы (проходные характеристики) шумового поля НИС «ТИНРО» (галсы 1, 2) и «Профессор Кагановский» (галсы 3, 4)

Fig. 5. Amplitude-time diagrams (running noise characteristics) of underwater noise field for RV TINRO (transects 1 and 2) and RV Professor Kaganovsky (transects 3 and 4)

тельного устройства, сначала при приближении к нему, а затем при удалении от него*). Хорошо видно нарастание и спад звукового давления во время прохода судна мимо гидрофонов. Максимальный уровень шума варьирует в зависимости от траверсного расстояния до судна. Амплитудно-временная структура шума также нестабильна и содержит аперриодические колебания среднего уровня сигнала 3–4 дБ (гидрофон 50 м), 2–3 дБ (гидрофон 15 м) и выбросы до 10 дБ, которые усиливаются по мере удаления судна от траверса и приближения уровня судового шума к фоновому (см. рис. 4).

* Рекомендации ..., 2004.

Спектр шума (частотная зависимость спектральных уровней) — сплошной с дискретными составляющими, занимает широкую полосу и содержит спектральные максимумы в диапазоне частот 50–200 Гц, варьирующие на галсах (рис. 6). Среднеквадратичные значения уровня звукового давления шума в области частот ниже 200 Гц составляют 120–130 дБ/1 мкПа в зависимости от расстояния до судна. Большая часть этого низкочастотного шума производится ВРШ и судовыми двигателями. Шумы более высоких частот создаются совокупным действием судовых двигателей, турбулентных потоков и кавитационного шума винтов (Mitson, 1995). Кроме этого, присутствуют дискретные составляющие на частотах 480 Гц, 970 Гц, 1450 Гц (рис. 6). Источником этих составляющих

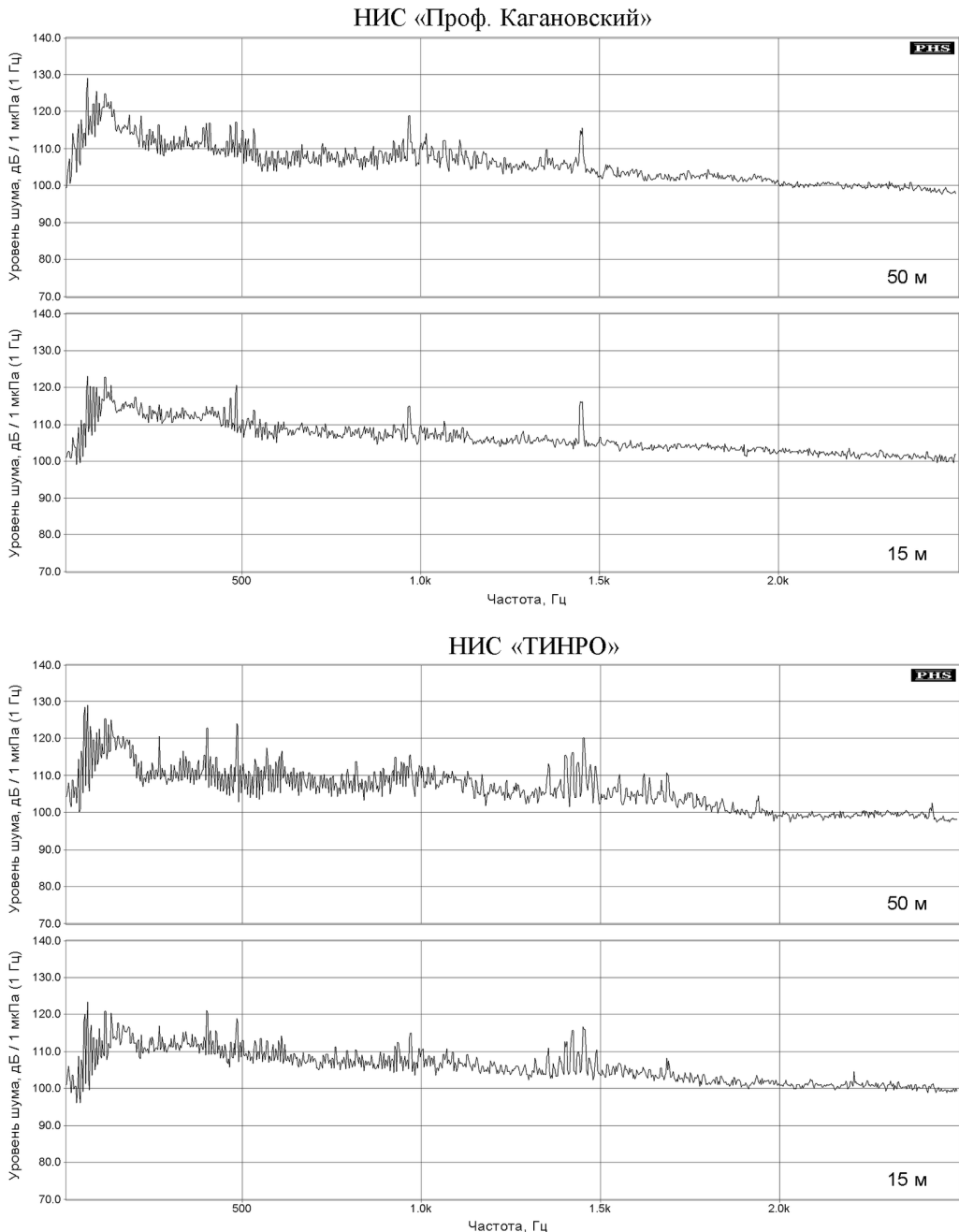


Рис. 6. Спектр несущих частот шума НИС «Профессор Кагановский» (галс 2) и «ТИНРО» (галс 3) вблизи траверса. Окно усреднения данных — 30 с, полоса анализа 1 Гц

Fig. 6. Spectrum of carrier frequencies for underwater noise abeam RV Professor Kaganovsky (transect 2) and RV TINRO (transect 3) (1 Hz, 30 s averaging)

ших, видимо, является редуктор, который обычно дает увеличение уровня излучения на определенной частоте (тоновый шум) в зависимости от конструкции и режима передачи усилия (Урик, 1978; Mitson, 1995). Форма и состав спектра достаточно стабильны от галса к галсу. Энергия спектра убывает с повышением частоты, что характерно для судового шума в целом, а на частотах свыше 200 Гц близко к «розовому» шуму с тенденцией спада спектральной плотности 3 дБ/октаву в сторону высоких частот (Сапожков, 1978).

Сонограмма иллюстрирует изменение уровня звукового давления и спектра частот шумового поля судна в точке регистрации во время прохода галса (рис. 7). Максималь-

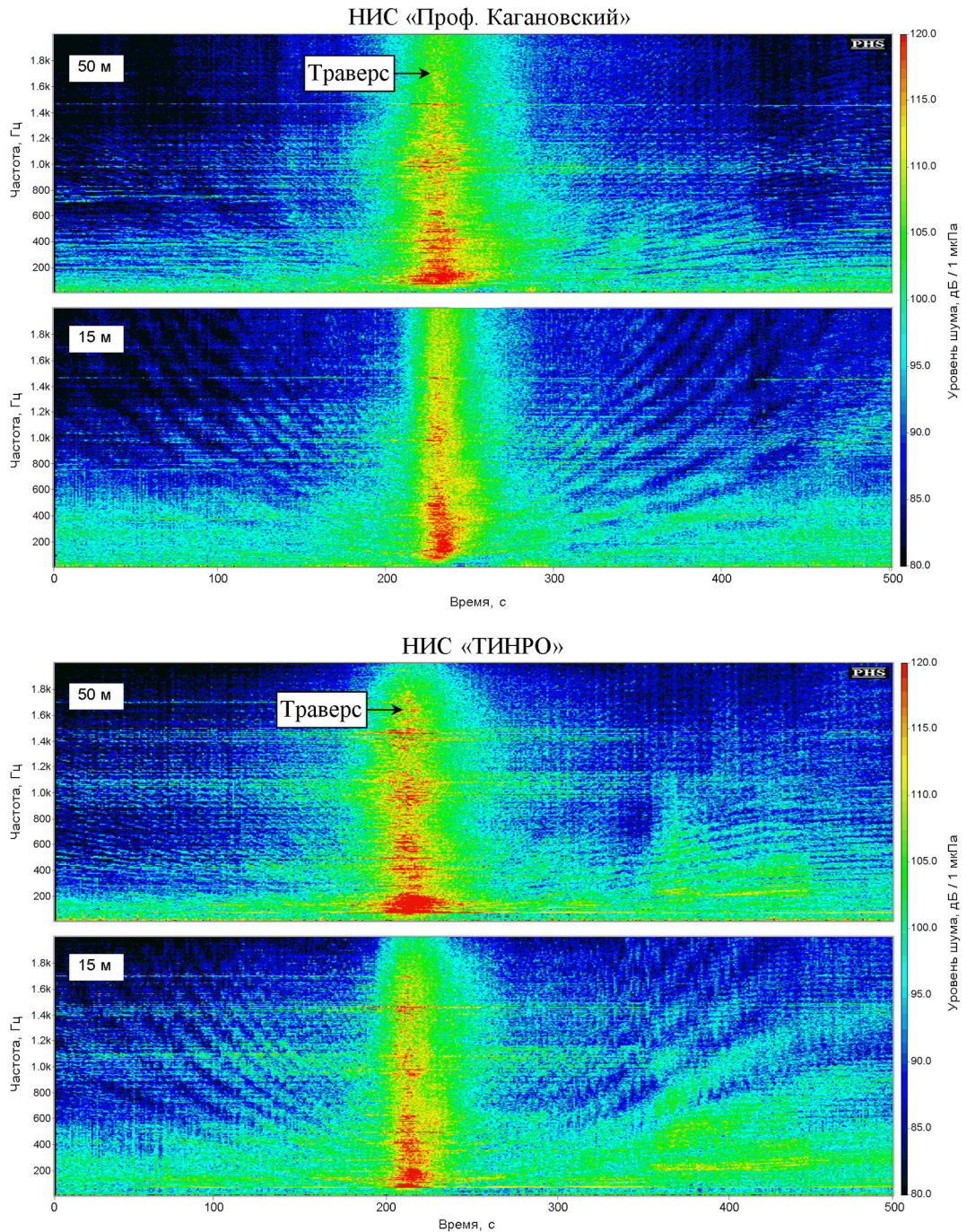


Рис. 7. Сонограммы спектра несущих частот судового шума на измерительном галсе
Fig. 7. Sonograms of carrier frequencies spectrum for underwater radiated noise from the vessel on the measuring transect

ный уровень шума отмечается вблизи траверса судна с концентрацией энергии в полосе частот ниже 2 кГц. Шумы смещены в низкочастотную область спектра (ниже 600 Гц). Наблюдается яркая интерференционная картина в пограничных с траверсом зонах галсов обоих судов с интервалом интерференции $\Delta F = 150\text{--}200$ Гц. Интерференция звука — сложение в пространстве двух или нескольких звуковых волн, при котором в разных точках пространства получается усиление или ослабление амплитуды результирующей волны. Наиболее отчетливо интерференция звука выражена на глубине 15 м как результат переотражения волн вблизи поверхности.

Согласно рекомендации ИКЕС (Mitson, 1995), уровень шума судов на частотах ниже 1,2 кГц не должен превышать порог двигательной реакции рыб на расстоянии около 20 м. Максимальный допустимый уровень шума судна, приведенный к расстоянию 1 м, 132 дБ/1 мкПа, определен исходя из отношения уровня шума к минимальному слуховому порогу атлантической сельди и трески на уровне 30 дБ (порог реакции). Для упрощения практической реализации требуемого значения принимается, что уровень шума имеет наклон от 135 дБ на частоте 1 Гц до 130 дБ на частоте 1 кГц.

Допустимые уровни высокочастотного судового шума определены на 6 дБ выше среднего уровня окружающего шума из условия их приемлемости для детектирования эхосигналов в результате наложения на полезный сигнал при эхосъемке. Для частоты 38 кГц (основная частота гидроакустической съемки) рассчитанный уровень шума составляет 95 дБ/1 мкПа/1 м (полоса 1 Гц). Угол наклона характеристики шума определен по линии, соединяющей уровень на частоте 38 кГц и 1 кГц (130 дБ). В результате рекомендуемые ИКЕС уровни шума могут быть вычислены по следующим формулам:

$$УШ_0 = 135 - 1,66\log(f_{Гц}), \text{ от } 1 \text{ Гц до } 1 \text{ кГц}; \quad (3)$$

$$УШ_0 = 130 - 22\log(f_{кГц}), \text{ от } 1 \text{ кГц до } 100 \text{ кГц}. \quad (4)$$

Графические изображения спектра излучаемого уровня шума обычно представляют в односторонней и 1/3-октавной полосе частот с соответствующей шкалой центральных частот, принятой для 1/3-октавного анализа спектра. Оба вида представлений имеют свои достоинства и недостатки.

Важное преимущество анализа в полосах частот с постоянной относительной шириной (октавного, 1/3-октавного) — возможность представления на едином графике широкого частотного диапазона (Петрухин, Петрухин, 2010). Это означает, что такие спектры позволяют лучше использовать динамический диапазон измерительных приборов. В 1/3-октавном спектре ширина анализируемых полос увеличивается пропорционально их центральным частотам, поэтому 1/3-октавные полосы достаточно узки на низких частотах; с ростом частоты разрешение падает. Поскольку спектры шума судов существенно спадают на высоких частотах, 1/3-октавный анализ дает удовлетворительные результаты. Но во многих случаях 1/3-октавные анализаторы не дают достаточных сведений о сигнале, и тогда прибегают к более детальному анализу в односторонней полосе частот. Узкополосный анализ используют для выявления дискретных составляющих и гармоник, которые часто присутствуют в шумовом спектре судна.

На рис. 8 показаны спектральные характеристики гидроакустического шума судов в 1/3-октавной полосе частот с соответствующей шкалой центральных частот, принятой для 1/3-октавного анализа. Кроме этого, на тех же графиках приведены границы допустимого уровня шума (формулы 3, 4) в 1/3-октавном виде (Mitson, 1995). Уровни шума, усредненные по трем галсам левым и правым бортами, представлены в децибелах относительно 1 мкПа и приведены к расстоянию 1 м. Спектры шумов обоих судов по форме и уровню в основном сходны. Имеются различия на отдельных частотах в низкочастотной области спектра. Например, в 1/3-октавной полосе частот с центром 63 Гц шумы НИС «ТИНРО» превышают шумы судна «Профессор Кагановский» на 7 дБ. На остальных частотах различие составляет не более 2 дБ.

Шумы от обоих судов превышают рекомендуемый ИКЕС уровень во всем диапазоне частот. Максимальные различия отмечаются в низкочастотной области спектра в диапазоне частот 60–200 Гц, где они составляют 20–22 дБ. На частотах выше 500 Гц превышение составляет не более 10 дБ (рис. 8).

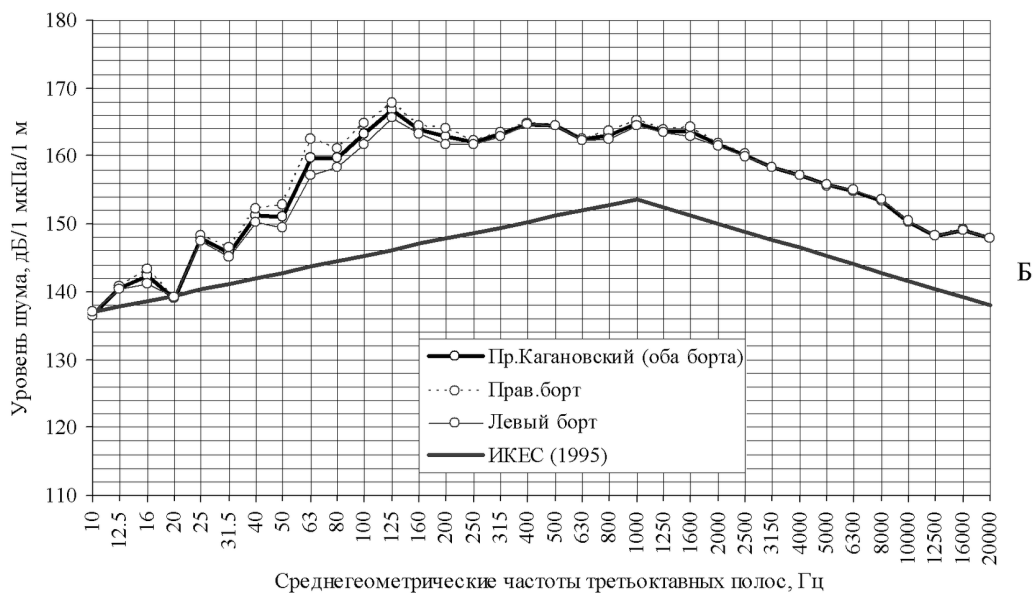
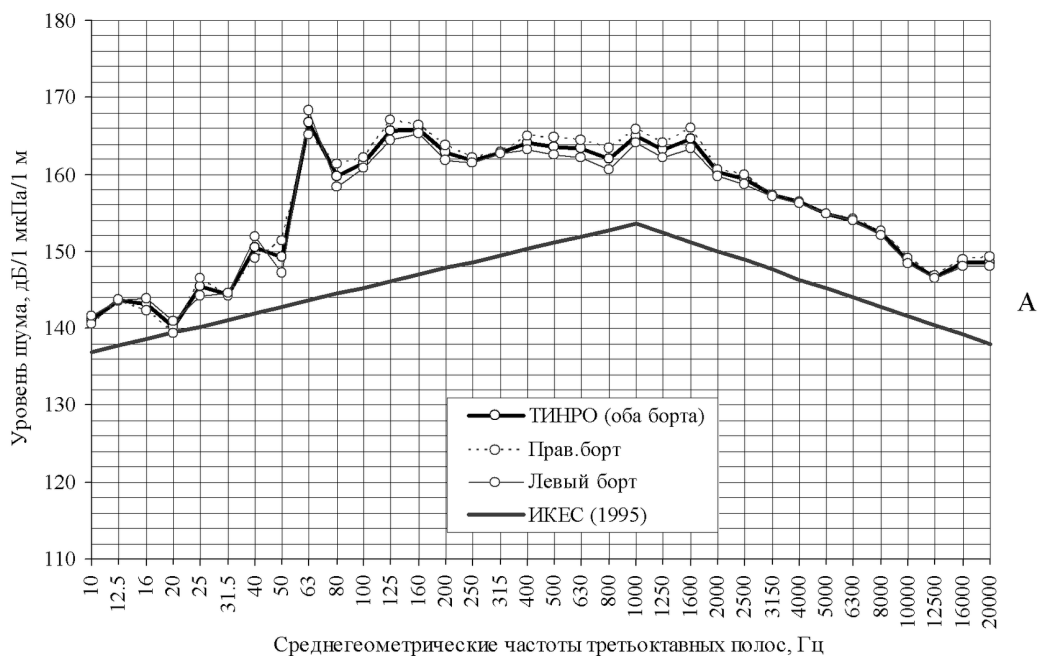


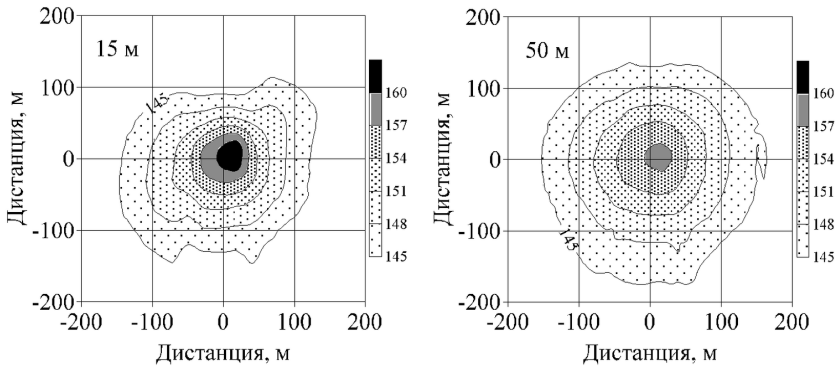
Рис. 8. Шумовые характеристики НИС «ТИНРО» (А) и «Профессор Кагановский» (Б) и границы рекомендованного ИКЕС уровня шума в 1/3-октавных диапазонах частот

Fig. 8. Noise characteristics of RV TINRO (A) and RV Professor Kaganovsky (B) in comparison with those recommended by ICES in 1/3 octave frequency bands

Характеристики пространственного распределения (диаграммы направленности) гидроакустического поля НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский» на глубинах 15 и 50 м для интегрального уровня звукового давления и отдельных дискретных составляющих шума в 1/3-октавных диапазонах частот показаны соответственно на рис. 9 и 10. Линии на рисунках соответствуют равным значениям интенсивности (звукового давления) шума в горизонтальной плоскости вокруг излучающего судна.

Диаграмма направленности звукового давления шума НИС «ТИНРО» заметно асимметрична относительно диаметральной плоскости судна. Пространственное распределение шумового поля НИС «ТИНРО» показывает, что это судно имеет повышенный уровень шума в носовом направлении левого борта 300–350° и в кормовом

НИС «Проф. Кагановский»



НИС «ТИНРО»

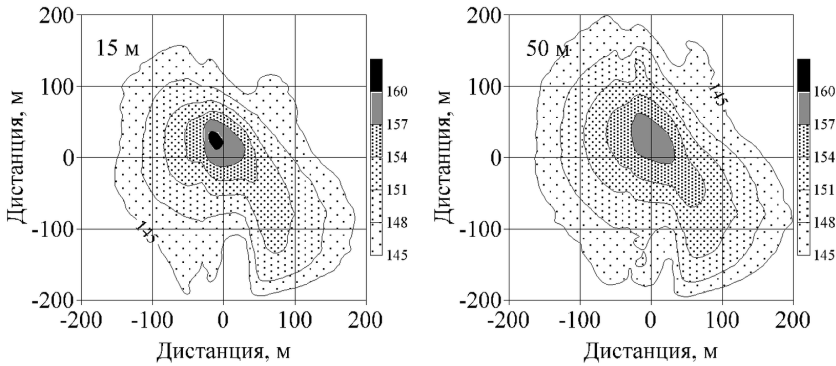


Рис. 9. Пространственные распределения интегрального уровня звукового давления шума в горизонтах глубин 15 и 50 м

Fig. 9. Spatial distribution of integrated sound pressure noise level at 15 and 50 m depth

направлении правого борта $120\text{--}170^\circ$ (рис. 9). Причиной этого может быть неравноценная работа главных судовых двигателей левого и правого борта, а также наличие дополнительных источников шума на судне, которые через фундаменты и конструктивные элементы, имеющие жесткие связи с корпусом, передаются в окружающую водную среду.

Характеристика направленности шумового поля НИС «Профессор Кагановский» в основном круговая, но на отдельных частотах в приповерхностном слое имеет классическую форму «бабочки» (например, на частотах 630, 800 и 1000 Гц, рис. 10). Объясняется это тем, что центром излучения является кормовая часть судна, где находятся гребной винт и главные судовые двигатели. Волны на пути от кормы к носу, при определенной их длине, экранируются корпусом судна — отсюда ослабление интенсивности акустического поля в носовой части судна на острых курсовых углах. За кормой при движении судна образуется кильватерная струя, насыщенная пузырьками воздуха, которые поглощают и рассеивают акустическую энергию, отсюда ослабление акустического поля за кормой по сравнению с другими направлениями вокруг судна (Урик, 1978). На более высоких частотах доминирующими становятся другие источники шума и в целом происходит уменьшение энергии и площади шумового поля судна.

Для обоих судов характерна значительно меньшая площадь шумового поля на глубине 15 м по сравнению с 50-метровым горизонтом на частотах ниже 250 Гц (рис. 10). Известно, что условия распространения гидроакустических сигналов зависят главным образом от состояния поля скорости звука, параметры которого определяются значениями температуры, солености и давления в каждой точке моря (Клей, Медвин, 1980). В неоднородной среде, т.е. состоящей из слоев, внутри которых скорость звука неодинакова, траектория луча при переходе границы между слоями с разными значениями

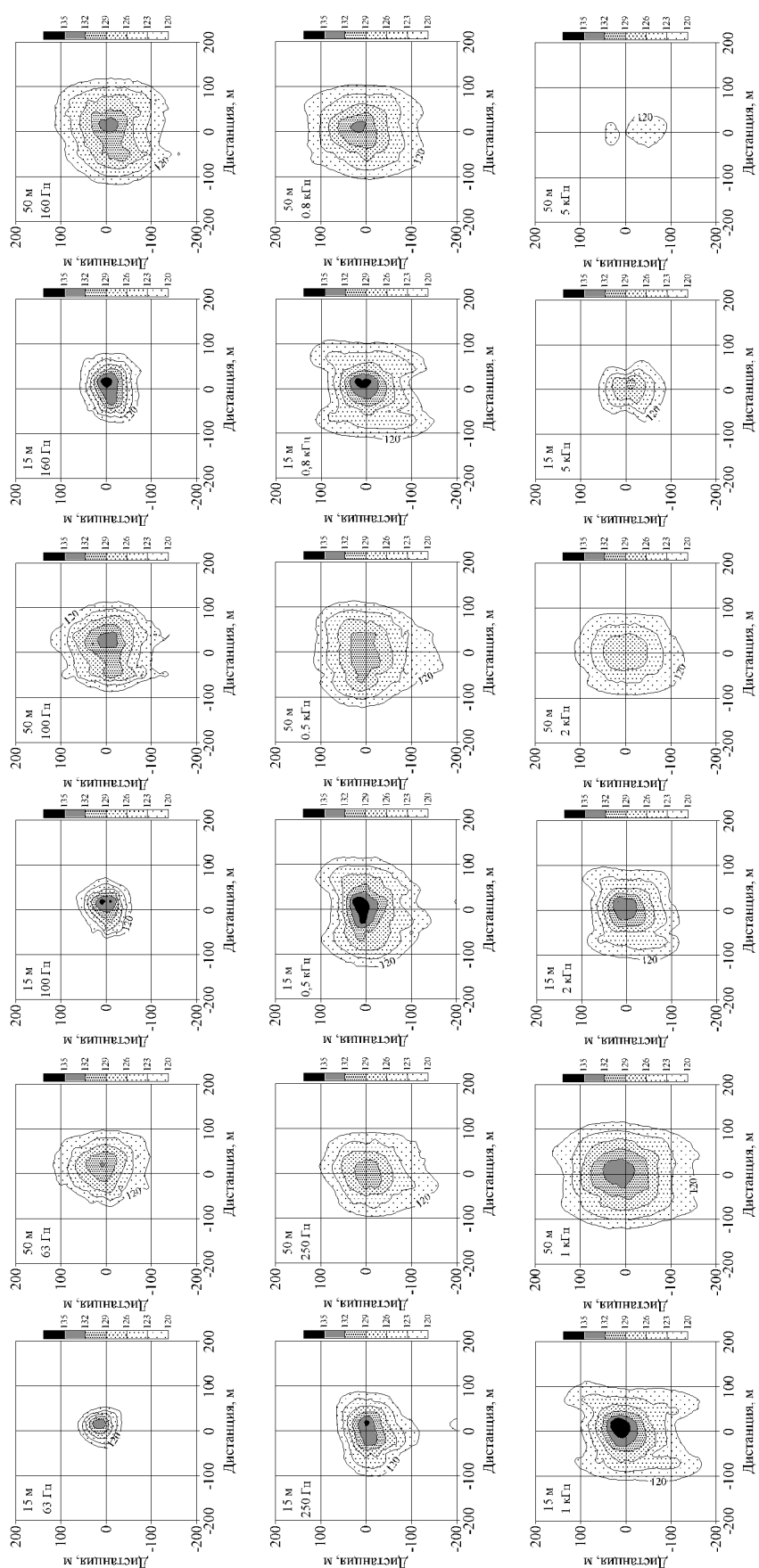


Рис. 10. Пространственное распределение звукового давления шума НИС «Профессор Кагановский» на горизонтах 15 и 50 м в 1/3-октавных диапазонах частот (указаны центральные частоты). Шкала — уровни шума в децибелах относительно 1 мкПа

Fig. 10. Spatial distribution of sound pressure level of RV Professor Kaganovsky noise in 1/3-octave bands (central frequencies are shown) at 15 and 50 m depth). Scale — the noise level in dB relative to 1 µPa

скорости звука будет искривляться. Это явление называется рефракцией. Акустические лучи преломляются в сторону уменьшения скорости звука. Если градиент скорости звука отрицательный, то наблюдается отрицательная рефракция — акустические лучи искривляются в сторону дна. В районе проведения измерений градиент температуры воды и, соответственно, скорости распространения звука был отрицательный. На низких частотах (примерно до 200 Гц) фронт излучаемой судном звуковой волны вследствие упомянутого выше искривления на некотором расстоянии от судна уходит на глубину, а гидрофон, расположенный в приповерхностном слое, оказывается в зоне акустической тени. Поэтому площадь шумового поля судна на глубине 15 м значительно меньше, чем в более глубоких горизонтах. С увеличением частоты (уменьшением длины волны) возрастает доля звуковой энергии, которая переносится вдоль поверхности. Это приводит к расширению границ распространения шума на малых глубинах (в наших измерениях — на 15 м).

Чтобы показать различия характеристик измеренного шума судов ТИНРО-центра по сравнению с другими судами и с допускаемыми ИКЕС мы объединили их на одном графике. Технические характеристики сравниваемых судов представлены в табл. 3.

Таблица 3
Технические характеристики судов

Table 3

Technical specifications of vessels

Параметр	НИС «ТИНРО»	РТМС «Простор»	НИС «Миллер Фримен»	НИС «Оскар Дайсон»
Длина, м	62,2	102,0	65,5	63,8
Ширина, м	13,6	15,2	12,8	15,0
Водоизмещение, т	2062	5368	1920	2479
Мощность двигателя, л.с.	1200 x 2	3880	2150	3084
Привод	Дизель-редукторный	Дизель-редукторный	Дизель-редукторный	Дизель-электрический
Гребной винт	ВРШ	ВРШ	ВРШ	ВФШ
Количество лопастей	4	3	4	5

Примечание. ВРШ — винт регулируемого шага, ВФШ — винт фиксируемого шага.

Поскольку в рекомендациях ИКЕС (Mitson, 1995) и в других источниках шумовые характеристики судов представляются большей частью в одногерцовой полосе частот вне зависимости от методики первичного анализа данных, результаты измерений уровней шума судов ТИНРО-центра для сопоставимости данных также приведены к полосе 1 Гц из соотношения (Урик, 1978)

$$УШ_{\text{пц}} = УШ_0 + 10 \log W, \quad (5)$$

где $УШ_{\text{пц}}$ — измеренный уровень звукового давления шума в полосе частот (1/3-октавной), дБ; $УШ_0$ — уровень шума в частотной полосе шириной 1 Гц (спектральный уровень шума в центре 1/3-октавной полосы), дБ; W — ширина полосы, Гц.

На рис. 11 показаны спектральные характеристики подводного шума НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО», приведенные к полосе 1 Гц, и еще трех судов различного класса и назначения. Как видно на рис. 11, на частотах свыше 100 Гц и примерно до 800 Гц, т.е. в области максимальной слуховой чувствительности большинства промысловых рыб, НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский» по уровню излучаемого шума занимают промежуточное положение между РТМС «Простор» (крупнотоннажное рыбопромысловое судно проекта «Прометей») и НИС «Миллер Фримен» (эксплуатируемый AFSC, NOAA USA, до 2006 г.) и превышают рекомендуемый ИКЕС уровень для научно-исследовательских судов на 10–20 дБ на разных частотах. В диапазоне максимальной чувствительности минтая и других тресковых 100–200 Гц шум НИС ТИНРО-центра на 10 дБ ниже РТМС «Простор» и на 8–12 дБ выше НИС «Миллер Фримен».

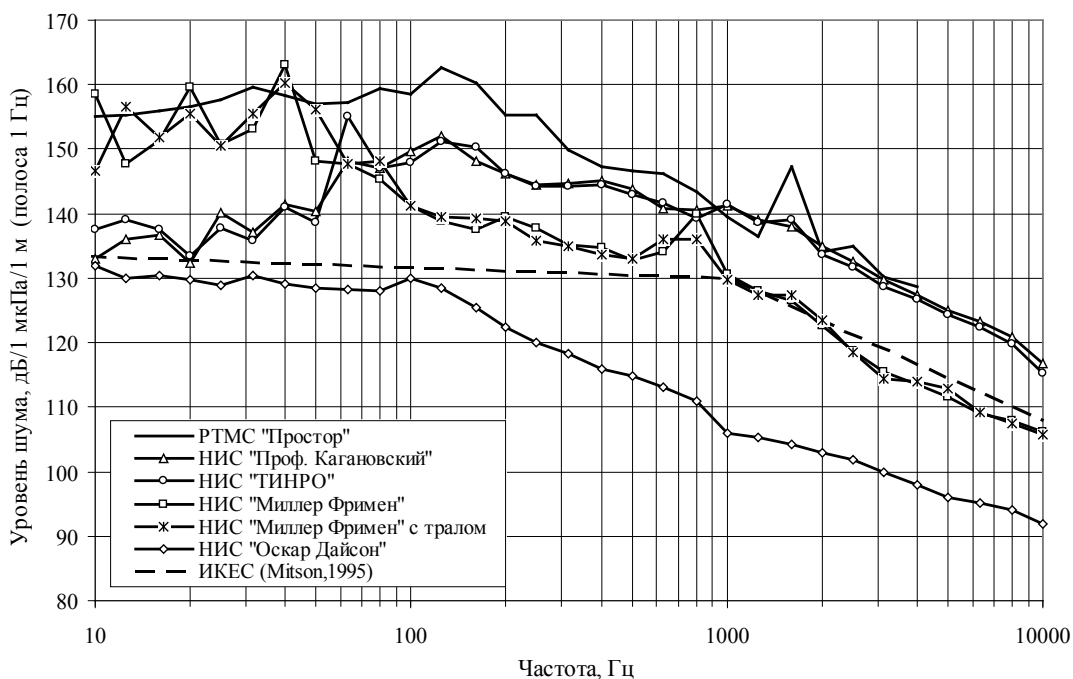


Рис. 11. Характеристики подводного шума судов: НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО» на свободном ходу (9,5 уз), РТМС «Простор» (6,0 уз), НИС «Миллер Фримен» на свободном ходу (11,0 уз) и с пелагическим тралом (3,3 уз) (De Robertis, Wilson, 2006); НИС «Оскар Дайсон» на свободном ходу (11,0 уз) (De Robertis et al., 2008) и рекомендуемый ИКЕС уровень шума (Mitson, 1995)

Fig. 11. Underwater noise characteristics for RV Professor Kaganovsky and RV TINRO (9.5 knots), factory trawler Prostor (6.0 knots), RV Miller Freeman (11.0 knots without trawl and 3.3 knots with pelagic trawl, from: De Robertis, Wilson, 2006); RV Oscar Dyson (11.0 knots, from: De Robertis et al., 2008), ICES recommendation (Mitson, 1995)

РТМС «Простор» — самое крупное судно с дизель-редукторным приводом и поэтому самое шумное из представленных. В диапазоне частот 100–1000 Гц высокий уровень шума этого судна (на 10–30 дБ выше рекомендованного ИКЕС) может быть вызван работой главного двигателя мощностью 3880 л.с. и кавитационным шумом от трехлопастного гребного винта. Источником дискретных составляющих шума на частотах 1500–1800 Гц (20 дБ выше ИКЕС), видимо, является редуктор. НИС «Миллер Фримен» на частотах свыше 100 Гц имеет шумы по уровню значительно ниже, чем РТМС «Простор» и наши НИС (кроме создаваемого редуктором пика на частоте 800 Гц), но превышающие рекомендуемый ИКЕС уровень на 3–10 дБ как на свободном ходу, так и с тралом, а на частотах выше 1000 Гц практически полностью укладываются в границы допустимого ИКЕС уровня шума.

НИС «Оскар Дайсон» (с 2006 г. используется в AFSC, NOAA USA, для проведения ресурсных исследований) — самое малошумное из представленных. Его спектрально-энергетические характеристики не превышают установленные ИКЕС нормы для судов, ведущих учет численности рыб, во всем диапазоне частот за счет дизель-электрического привода и гребного винта фиксированного шага, состоящего из 5 лопастей. В диапазоне максимальной чувствительности рыб 100–200 Гц шум НИС ТИНРО-центра с дизель-редукторным приводом превышает шум «Оскар Дайсон» на 18–24 дБ. С увеличением частоты разница уровней шума растет и на 1 кГц составляет 35 дБ (рис. 11).

Как было показано нами ранее (Кузнецов, 2011), наиболее интенсивные составляющие шума судов и минимальные значения слуховых порогов большинства промысловых рыб расположены в одной и той же части спектра. Имея данные о характеристиках акустического поля судна и спектральной чувствительности рыб, можно оценить дистанции реагирования различных видов рыб и прогнозировать изменение их поведения

и распределения в различных зонах промысловой системы судно–трал. На рис. 12 представлены отражающие результаты расчетов зависимости от частоты дистанции реагирования наиболее массовых объектов ресурсных исследований и промысла в дальневосточных морях на гидроакустические шумы сравниваемых судов в диапазонах слуха этих рыб. Дистанции на рис. 12 соответствуют второй фазе реакции, когда уровень шума судна превышает порог реакции избегания и происходит направленное движение рыб от источника шума (Кузнецов, 2011). Как и по уровню излучаемого шума, по дальности действия НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО» в области максимальной слуховой чувствительности рыб занимают промежуточное положение между НИС «Миллер Фримен» и РТМС «Простор».

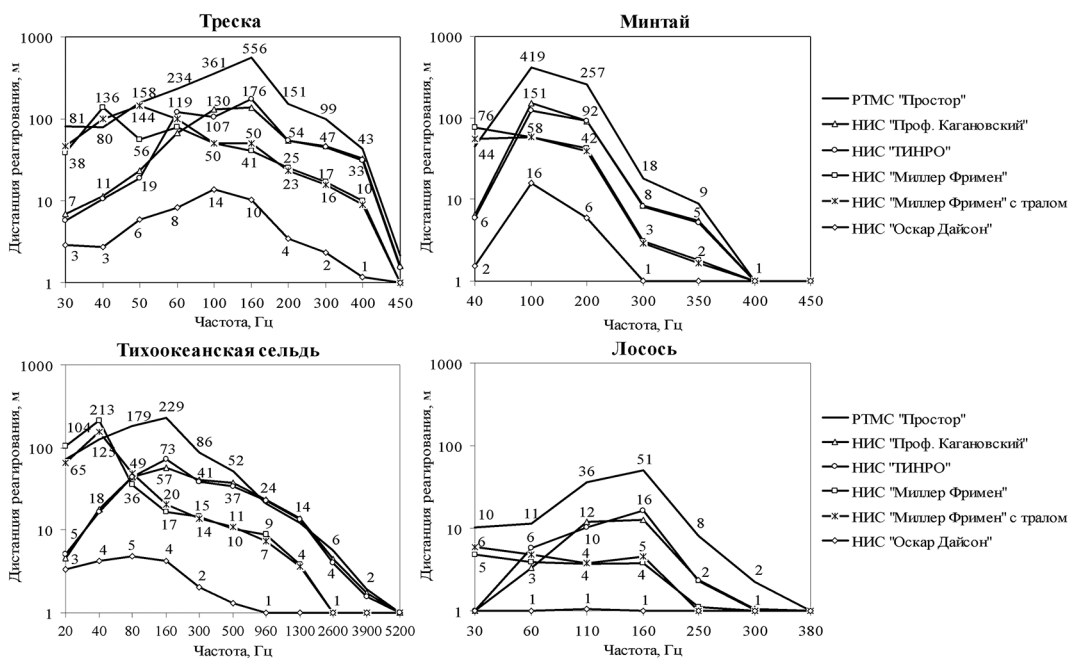


Рис. 12. Дистанции реагирования различных видов промысловых рыб на шумы судов
 Fig. 12. Distance of fish reaction to vessel noise for certain commercial species

Дистанции реагирования выбранных объектов существенно зависят от характеристик их слуховой чувствительности и интенсивности шумового поля. Как видно на рис. 12, наиболее чувствительными к судовому шуму объектами являются треска и минтай, а наибольшую дальность действия на рыб имеет самое шумное из судов — РТМС «Простор» (более 500 м для трески и более 400 м для минтая). НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО» имеют вторую по дистанции зону реакции на них минтая (150 м) и трески (около 180 м). НИС «Миллер Фримен» — второй после РТМС «Простор» по дистанции избегания его тихоокеанской сельдью (свыше 200 м). По тем же расчетам лосося значительно могут реагировать только на шум РТМС «Простор» на расстояниях до 50 м. Шумы обоих НИС ТИНРО-центра и НИС «Миллер Фримен» не оказывают существенного влияния на распределение лососей (расчетные расстояния не превышают рекомендованные ИКЕС 20 м). НИС «Оскар Дайсон» в дистантных показателях из рассмотренных видов рыб может оказывать влияние только на треску и минтая, но тоже на весьма незначительных расстояниях (меньше 20 м), не превышающих рекомендуемые ИКЕС во всем диапазоне воспринимаемых этими рыбами частот (Mitson, 1995).

Заключение

С использованием калиброванной гидрофонной системы выполнены измерения характеристик подводного шума двух судов ТИНРО-центра типа СТМ проекта «Ат-

лантик-833» — НИС «ТИНРО» и «Профессор Кагановский», используемых для исследований биологических ресурсов в Беринговом и Охотском морях, их сравнение с рекомендуемыми ИКЕС и с аналогичными характеристиками других судов. Оценены дистанции, с которых начинается движение наиболее массовых видов рыб от судна.

Измерения показали, что шумы от обоих судов превышают рекомендуемый ИКЕС уровень шума для научно-исследовательских судов (Mitson, 1995) и допустимые пределы подводного шума (Кузнецов, 2011) во всем диапазоне излучаемого ими спектра частот. Превышение уровня шума НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО», измеренного в 1/3-октавных полосах частот, составляет 20–22 дБ (в 10–12 раз) в низкочастотной области спектра в диапазоне частот ниже 200 Гц и на 10 дБ (в 3 раза) на частотах выше 500 Гц. При таких уровнях шума расчетные дистанции реагирования на них массовых промысловых рыб, например минтая и других тресковых, составляют 150 м и более. Это означает, что в процессе эхоинтеграционно-траловых съемок на этих расстояниях от судна возможна активная избегательная реакция рыб и, как следствие, искажение их естественного распределения и концентрации на пути судна. В результате возникает ошибка в эхоинтеграционной оценке численности из-за изменения плотности скопления рыб в пространстве эхолотирования под судном. При траловой съемке погрешность измерения плотности скопления рыб дополнительно возрастает за счет избегающей реакции рыб в пространстве между судном и тралом.

В заключение отметим, что у НИС «Профессор Кагановский» и «ТИНРО» превышение уровня шума и влияние на поведение рыб гораздо меньше, чем у крупнотоннажного судна типа РТМС (рис. 11, 12). Тем не менее для проведения тралово-акустических съемок предпочтительны суда с более низким уровнем гидроакустического шума. Для сравнения НИС «Оскар Дайсон» — представитель нового поколения судов — по уровню шума не превышает установленные ИКЕС нормы во всем диапазоне частот, а в дистантных показателях зоны реакции рыб не превышают 20 м от судна. Полученные данные должны быть учтены при проектировании и строительстве следующего поколения научно-исследовательских судов. Кроме этого, измеренные характеристики гидроакустического поля судов ТИНРО-центра будут использованы в действующей модели поведения рыб для решения задач оценки взаимодействия объектов с системой судно–трал и при разработке программных средств компенсации потерь энергии эхосигнала при эхоинтеграционной оценке запасов и определении уловистости трала.

Список литературы

- Изак Г.Д., Гомзиков Э.А.** Шум на судах и методы его уменьшения : монография. — М. : Транспорт, 1987. — 303 с.
- Исакович М.А.** Общая акустика : монография. — М. : Наука, 1973. — 496 с.
- Клей К.С., Медвин Г.** Акустическая океанография : монография. — М. : Мир, 1980. — 580 с.
- Коротков В.К.** Реакции рыб на трал, технология их лова : монография. — Калининград : МАРИНПО, 1998. — 398 с.
- Кузнецов М.Ю.** Дистанции реагирования различных видов рыб на гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и допустимые уровни шума // Изв. ТИНРО. — 2011. — Т. 164. — С. 157–176.
- Кузнецов М.Ю., Вологдин В.Н.** Гидроакустические шумы промысловых и научно-исследовательских судов и их влияние на поведение и оценки запасов рыб (обзор и перспективы исследований) // Изв. ТИНРО. — 2009. — Т. 157. — С. 334–355.
- Кузнецов Ю.А., Китлицкий В.С., Федосенков В.С., Шибков А.Н.** Методика исследования гидроакустических шумов промысловых судов // Промышленное рыболовство. — Владивосток : ТИНРО, 1979. — Вып. 9. — С. 86–90.
- Кузнецов Ю.А., Кузнецов М.Ю.** Обоснование и разработка методов и средств промысловой биоакустики : монография. — Владивосток : Дальрыбвтуз, 2007. — 339 с.
- Левашов Д.Е.** Современные суда и судовое оборудование для рыбопромысловых исследований : монография. — М. : ВНИРО, 2010. — 400 с.
- Петровский В.С.** Гидродинамические проблемы турбулентного шума : монография. — Л. : Судостроение, 1966. — 252 с.

- Петрухин В.В., Петрухин С.В.** Основы вибродиагностики и средства измерения вибрации : монография. — М. : Инфра-Инженерия, 2010. — 175 с.
- Протасов В.Р.** Биоакустика рыб : монография. — М. : Наука, 1965. — 207 с.
- Протасов В.Р.** Поведение рыб : монография. — М. : Пищ. пром-сть, 1978. — 295 с.
- Сапожков М.А.** Электроакустика : монография. — М. : Связь, 1978. — 272 с.
- Сорокин М.А.** Слуховые способности некоторых дальневосточных рыб : автореф. дис. ... канд. биол. наук. — М. : ИЭМЭЖ, 1984. — 28 с.
- Тукиянен А.Н., Теверовский Г.В., Цыганков С.Г.** Измерение шумности — актуальная задача // Судостроение. — 2005. — № 6(763). — С. 39–40.
- Урик Р.Д.** Основы гидроакустики : монография. — Л. : Судостроение, 1978. — 448 с. (Пер. с англ.)
- Blaxter J.H.S.** The swimbladder and hearing // Hearing and sound communication in fishes. — N.Y., 1981. — P. 39–60.
- De Robertis A., Handegard N.O.** Fish avoidance of research vessels and the efficacy of noise-reduced vessels: a review // ICES J. Mar. Sci. — 2013. — Vol. 70. — P. 34–45.
- De Robertis A., Hjellvik V., Williamson N.J., Wilson C.D.** Silent ships do not always encounter more fish: comparison of acoustic backscatter recorded by a noise-reduced and a conventional research vessel // ICES J. Mar. Sci. — 2008. — Vol. 65. — P. 623–635.
- De Robertis A., Wilson C.D.** Silent ships sometimes do encounter more fish. 2. Concurrent echosounder observations from a free-drifting buoy and vessels // ICES J. Mar. Sci. — 2010. — Vol. 67(5). — P. 996–1003.
- De Robertis A., Wilson C.D.** Walleye pollock respond to trawling vessels // ICES J. Mar. Sci. — 2006. — Vol. 63. — P. 514–522.
- De Robertis A., Wilson C.D., Williamson N.J. et al.** Silent ships sometimes do encounter more fish. 1. Vessel comparisons during winter pollock surveys // ICES J. Mar. Sci. — 2010. — Vol. 67(5). — P. 985–995.
- Hawkins A.D.** The hearing abilities of fish // Hearing and sound communication in fishes. — N.Y., 1981. — P. 109–138.
- Johannesson K.A., Mitson R.B.** Fisheries acoustics. A practical manual for aquatic biomass estimation. — Rome : Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1983. — 249 p.
- Kalmijn A.J.** Hydrodynamic and acoustic field detection // Sensory Biology of Aquatic Animals. — Springer-Verlag, 1988. — P. 83–130.
- Kasumyan A. O.** Structure and function of the auditory system in fishes // J. Ichthyol. — 2005. — Vol. 45, Suppl. 2. — P. 223–270.
- Kuiper J.W.** Frequency characteristic and functional significance of the lateral line organ // Lateral line detectors. — Bloomington, 1967. — P. 105–121.
- Lewis E.R.** Inertial motion sensors // Comparative Physiology of Sensory Systems. — Cambridge : Cambridge Univ. Press., 1984. — P. 587–610.
- McQuinn I.H.** A review of the effects of fish avoidance and other fish behaviours on acoustic target strength, special identification and biomass estimation : ICES FASTWG. — St. John's, Canada, 1999. — 17 p.
- Mitson R.B.** Underwater noise of research vessels: review and recommendations : ICES Cooperative Research Report. — 1995. — № 209. — 61 p.
- Ona E., Godø O.R., Handegard N.O. et al.** Silent research vessels are not quiet // J. Acoustical Society of America. — 2007. — Vol. 121. — P. 145–150.
- Popper A.N., Fay R.R., Platt C., Sand O.** Sound detection mechanisms and capabilities of teleost fishes // Sensory Processing in Aquatic Environments. — N.Y. : Springer-Verlag, 2003. — P. 3–38.
- Sand O.** The lateral-line and sound reception // Hearing and sound communication in fishes. — N.Y. : Springer, 1981. — P. 459–480.
- Sand O., Hawkins A.D.** Acoustic properties of the cod swimbladder // J. Exp. Biol. — 1973. — Vol. 58, № 3. — P. 797–820.
- Sand O., Karlsen H.E.** Detection of infrasound by the Atlantic cod // J. Exp. Biol. — 1986. — Vol. 125. — P. 197–204.
- Vabø R., Olsen K., Huse I.** The effect of vessel avoidance of wintering Norwegian spring spawning herring // Fish. Res. — 2002. — Vol. 58. — P. 59–77.

Поступила в редакцию 11.03.14 г.