

УДК 500.7

## Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной среде

М. В. Пахомов, А. А. Зайцев\*, Ю. В. Литвинов, А. Р. Трошичев

\*Мурманский морской биологический институт РАН, г. Мурманск, Россия;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

### Информация о статье      Реферат

Поступила  
в редакцию  
30.03.2023;

получена  
после доработки  
27.04.2023;

принята  
к публикации  
10.05.2023

### Ключевые слова:

серый тюлень,  
аудиограмма,  
слух в воздухе,  
слух под водой

Антропогенная шумовая нагрузка на традиционные места обитания морских млекопитающих продолжает возрастать в связи с активным освоением Арктической зоны. Изучение слуха арктических тюленей имеет большое значение для разработки мер по снижению степени воздействия техногенных шумов. В ходе исследования группу из десяти серых тюленей разного возраста и пола обучили нажимать на специальную клавишу при демонстрации звука чистого тона с частотой из стандартного и расширенного набора частот, рекомендованных для проведения тональной аудиометрии. Эксперименты проводили при размещении клавиши и источника звука в воздушной и водной (на глубине 2 м) среде. Основным показателем являлось время реакции тюленя на демонстрируемый стимул. Для каждого тюленя были составлены индивидуальные аудиограммы для слуха в воздухе и воде с использованием 32 частот. Анализ полученных данных показал, что время реакции может служить индивидуальным показателем при исследовании слуха серых тюленей, отражающим их возрастные особенности. По времени реакции на звуки с разной частотой тона можно установить биологически значимые и индифферентные частоты для серых тюленей.

### Для цитирования

Пахомов М. В. и др. Применение методов тональной аудиометрии для оценки слуха серых тюленей в воздушной и водной среде. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 121–130. DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130)

## Application of tonal audiometry methods to assess the hearing of grey seals in air and water environments

Miron V. Pakhomov, Alexandr A. Zaytsev\*, Yuri V. Litvinov, Alexandr R. Troshichev

\*Murmansk Marine Biological Institute RAS, Murmansk, Russia;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

### Article info

Received  
30.03.2023;

received  
in revised  
27.04.2023;

accepted  
10.05.2023

### Key words:

grey seal,  
audiogram,  
hearing in the air,  
hearing underwater

### Abstract

Anthropogenic noise load on the traditional habitats of marine mammals continues to increase due to the active development of the Arctic zone. The study of the hearing of Arctic seals is of great importance for the development of measures to reduce the impact of technogenic noise. During the study, a group of ten grey seals of different ages and genders has been trained to press a special key when demonstrating a pure tone sound with a frequency from the standard and extended set of frequencies recommended for pure tone audiometry. The experiments have been carried out by placing the key and the sound source in air and water (at a depth of 2 m) environment. The main indicator is the reaction time of the seal to the demonstrated stimulus. For each seal, individual audiograms for hearing in air and in water have been compiled using 32 frequencies. An analysis of the data obtained has shown that the reaction time can serve as an individual indicator in the study of the hearing of grey seals reflecting their age characteristics. According to the response time to sounds with different tone frequencies it is possible to establish biologically significant and indifferent frequencies for grey seals.

### For citation

Pakhomov, M. V. et al. 2023. Application of tonal audiometry methods to assess the hearing of grey seals in air and water environments. *Vestnik of MSTU*, 26(2), pp. 121–130. (In Russ.) DOI: [10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130](https://doi.org/10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130)

## Введение

Степень влияния антропогенного шумового загрязнения на морских млекопитающих является дискуссионным вопросом. Ряд авторов указывает, что морские млекопитающие покидают зоны с повышенным уровнем техногенного акустического шума; примером может служить снижение численности ластоногих в районе расположения ветроэлектростанций (*Wilson et al., 2010*) или сокращение численности морских котиков в районе лежки вблизи от Пеликан Пойнт (Намибия) в результате увеличения морских и наземных перевозок (*Martin et al., 2022*). Однако многие авторы публикуют результаты наблюдений за лежбищами ластоногих вблизи аэропортов или портов, где уровень шума достаточно высок (*Johnson et al., 1989; Bonner, 1983*). Явные патологические изменения слуха у морских млекопитающих фиксируются при воздействии мощных источников звуковых сигналов, таких как сонары (*Harris et al., 2018*) и подводные взрывы (*Wiggins et al., 2021*), тем не менее в таких случаях сложно отличить травмирующее действие взрывной волны от воздействий именно звуковых колебаний.

Антропогенная нагрузка на традиционные места обитания морских млекопитающих, прежде всего арктических тюленей, продолжает возрастать в связи с активным освоением Арктической зоны. В указе Президента РФ от 26.10.2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 г."<sup>1</sup> предполагается интенсивное развитие судоходства и соответствующей портовой инфраструктуры региона на всем протяжении Северного морского пути. Согласно этому документу регион может пострадать из-за возрастающего антропогенного воздействия и сопутствующих климатических и экологических изменений, что, несомненно, увеличит шумовую нагрузку и на морских млекопитающих.

Таким образом, изучение слуха морских млекопитающих имеет большое значение для разработки мер по снижению степени воздействия техногенных шумов, оптимизации маршрутов и правил судоходства в арктических морях, правил по строительству и эксплуатации морской и прибрежной инфраструктуры в Арктическом регионе. Одним из наиболее информативных и наименее травмирующим методом исследования слуха является тоновая аудиометрия, так как, во-первых, в ходе ее применения собрана база данных медицинских и ветеринарных исследований, во-вторых, указанный метод отлично адаптируется с методами регистрации поведенческих реакций, используемых при работе с морскими млекопитающими. В научной литературе представлены исследования слуха серых тюленей в воздушной среде (*Ruser et al., 2014*), ларг (*Sills et al., 2014*) и кольчатых нерп (*Sills et al., 2015*) в воздушной и водных среде. Основным показателем слуха в этих исследованиях служил пороговый уровень звукового давления, при котором животное выказывало поведенческую реакцию (*Sills et al., 2014; 2015*) или регистрировались вызванные потенциалы спинного мозга (*Ruser et al., 2014*). Следует отметить, что обе методики требуют либо долговременной высококвалифицированной тренерской подготовки исследуемого животного, либо применения наркоза, как при изучении слуха серых тюленей.

При применении тоновой аудиометрии основным показателем являлось время реакции на предъявляемый звуковой стимул, т. е. время между началом демонстрации звукового сигнала и нажатием на специальную клавишу. В предыдущих исследованиях зрения (*Пахомов и др., 2022*) и слуха (*Литвинов и др., 2019; 2022*) серых тюленей было установлено, что время реакции является достаточно надежным показателем сенсомоторной реакции исследуемого животного на стимулы разной модальности.

В ходе исследований (*Литвинов и др., 2022*) тюлени были обучены реагировать нажатием на клавишу при демонстрации чистого тона на заданной частоте. Работы проводились в воздушной среде с использованием 10 типовых частот (125, 250, 500, 1 250 Гц; 3, 8, 12,5, 16, 20 кГц), наиболее часто применяемых при изучении слуха ластоногих (*Ruser et al., 2014; Sills et al., 2014; 2015*). Экспериментально установлено, что время реакции на звуковой раздражитель может быть показателем сенсомоторной реакции серых тюленей. Полученные данные продемонстрировали индивидуальные, возрастные, половые различия испытуемых серых тюленей во времени реакции на звуки с разной частотой тона и послужили основой для исследования слуха серых тюленей не только в воздушной, но и в водной среде, с использованием как стандартного, так и расширенного набора частот, рекомендованных для проведения тональной аудиометрии (ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017).

Целями настоящего исследования являются: 1) установление для каждого исследуемого тюленя показателей времени реакции на звуковой стимул чистого тона с частотами из наборов стандартного и расширенного диапазонов, используемых в тональной аудиометрии; 2) получение данных о восприятии набора звуковых стимулов в воздушной среде и аналогичных наборов звуковых стимулов в водной среде; 3) определение индивидуальных отличий во времени реакции на звуковой стимул в зависимости от частоты тона при восприятии в воздушной и водной среде; 4) сравнительный анализ индивидуальных показателей тюленей и выявление возрастных и половых отличий.

---

<sup>1</sup> Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 "О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года".

## Материалы и методы

Экспериментальные работы проведены в аквакомплексе Мурманского морского биологического института РАН (ММБИ РАН) в Кольском заливе Баренцева моря.

В качестве экспериментальных животных использовались серые тюлени (*Halecoerus grampus* Fabricius, 1791), которые подразделялись на три возрастных группы: 15-летние – 4 самки (тюлени под номерами 1–4); 5-летние – 3 самки (номера 5–7) и 1 самец (номер 8); 6-месячные самцы (номера 9 и 10). Все животные принадлежали к одной популяции; 15- и 5-летние тюлени в разное время были отловлены в районе Айновых островов в период окончания постнатальной линьки; 6-месячные тюлени были рождены самкой под номером 4 (тюлень 9 – в 2019 г., тюлень 10 – в 2021 г.). Эксперименты со взрослыми тюленями и молодым тюленем 9 проводились с 2020 г., с молодым тюленем 10 – с 2022 г.

Работы выполняли по парадигме "стимул – реакция", где стимулом служил звук чистого тона на различных частотах, а реакцией – нажатие тюленем специальной клавиши. Верная реакция подкреплялась пищевым поощрением в виде кусочка рыбы, вес одной порции рассчитывался индивидуально для каждого тюленя.

На момент начала экспериментальных работ все тюлени были физически здоровы, девиаций в поведении не имели; с ними проводились тренировки по выработке и закреплению навыка "стартовая позиция", когда тюлень должен находиться в определенной позиции и не покидать ее до подачи тренером команды (сигнала) на какое-либо действие. В ходе подготовительных тренировок команда тренера заменялась на звуковой сигнал экспериментальной установки, по которому тюлень должен был нажать на клавишу. В надводном положении тюлень располагался вертикально, по шее погружался в воду и удерживал морду на расстоянии не более 1 см от клавиши (или вплотную к ней), ожидая подачи звукового сигнала. Данная позиция была отработана с помощью команды "Таргет!" и поощрения требуемой позиции. В подводном положении тюлень находился в горизонтальном положении на глубине 2 м и также удерживал морду на расстоянии не более 1 см от клавиши (или вплотную к ней), ожидая подачи звукового сигнала. Данная позиция формировалась на базе уже отработанной позиции в надводном положении, но теперь подкреплялось вертикальное "зависание" тюленя на уровне клавиши. Выработка этой позиции упрощалась тем, что подобное зависание является характерным паттерном поведения серого тюленя, которое в естественных условиях используется для засадной охоты (*Bouveroux et al., 2014*). Также у всех исследуемых животных был сформирован навык "концентрации на выполняемой задаче", т. е. подаваемые тренером и экспериментальной установкой команды выполнялись четко и максимально быстро.

У 15- и 5-летних тюленей большинство навыков были отработаны в ходе предыдущих научных и научно-практических работ; 6-месячных тюленей в разное время обучали необходимым навыкам (начиная с 3-месячного возраста).

Для проведения исследования была разработана экспериментальная установка (рис. 1). Тюленям демонстрировались 32 чистых тона из стандартного (125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 750, 800, 1 000, 1 250, 1 500, 1 600, 2 000, 2 500, 3 000, 3 150, 3 200, 4 000, 5 000, 6 000, 6 300, 8 000 Гц) и из расширенного набора частот (9 000, 10 000, 11 200, 12 500, 14 000, 16 000, 18 000, 20 000 Гц), рекомендованных для проведения тональной пороговой аудиометрии (ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017)<sup>2</sup>. Звуковой сигнал создавался в генераторе частоты на основе микросхемы AD9833 по команде с микроконтроллера Arduino UNO R3 и проходил предусиление на цифровом широкодиапазонном усилителе на базе чипа TDA2050, а затем усиливался на усилителе Ural BV 2.70. Звуки на частотах до (и включая) 1 000 Гц воспроизводились на подводной колонке Aquasonic AQ339 (2a); звуки на частотах свыше 1 000 Гц воспроизводились с помощью акустического излучателя на основе пьезоэлектрической диафрагмы CBC2065BAL (2b). Блок динамиков (2) и клавишу (3) размещали на дистанции 1 м друг от друга в воздухе на высоте 30 см от уровня воды и под водой на глубине 2 м.

На каждой тренировке с тюленем проводились работы как в воздушной среде, так и в водной; при этом очередность размещения оборудования в воздушной и водной среде изменялась. Если на первой тренировке сначала оборудование размещалось над водой, а затем погружалось на глубину 2 м, то на следующей сначала проводились подводные испытания, а по их завершении – надводные, и наоборот. Для тюленей 1–9 вопрос первого размещения оборудования решался с помощью порядкового номера исследуемого животного: четные номера – первое размещение оборудования в воздушной среде, нечетные номера – в водной. Для молодого тюленя 10 было выбрано первое размещение оборудования в воздушной среде.

Частоты были разделены на три блока: низкие (125–800 Гц); средние (1 000–8 000 Гц); высокие (9 000–20 000 Гц). Сначала с тюленем отработывался блок средних частот, затем низких, затем высоких. В каждом блоке каждая частота звучала дважды. Последовательность частот генерировалась случайным образом, при этом одна и та же частота не воспроизводилась дважды подряд. Для генерации случайных

<sup>2</sup> ГОСТ Р МЭК 60645-1-2017. Электроакустика. Аудиометрическое оборудование. Часть 1. Оборудование для тональной и речевой аудиометрии. 2017.

чисел использовался интегрированный в Arduino UNO R3 генератор псевдослучайных чисел с источником в виде электромагнитных помех на первом аналоговом входе.

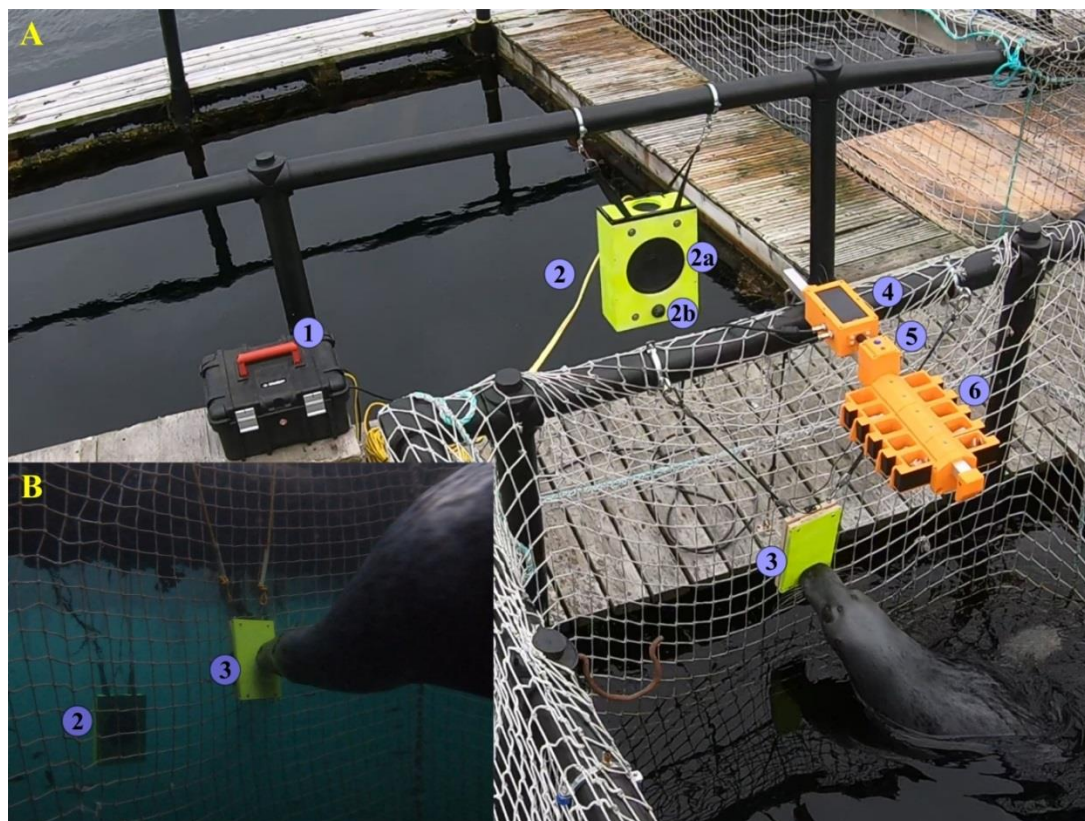


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: А – в надводном положении; Б – в подводном положении; 1 – блок питания, генерации и усиления звукового сигнала; 2 – блок динамиков; 2а – низкочастотный динамик; 2б – высокочастотный динамик; 3 – клавиша для взаимодействия с тюленем; 4 – блок управления; 5 – пульт управления; 6 – блок контейнеров с рыбой

Fig. 1. Experimental installation scheme: A – in air, B – in water; 1 – power, generation and amplifying unit; 2 – acoustic speaker's complex; 2a – low frequency speaker; 2b – high-frequency speaker; 3 – the key for interacting with the seal; 4 – control unit; 5 – control plate; 6 – a case of containers with fish

Интенсивность звука была константна и составляла 50 Дб (отн. 20 мкПа) на расстоянии 1 м от источника на всем диапазоне используемых частот; уровень громкости подстраивался системой автоматически для каждой частоты в соответствии с калибровочными данными для воздушной и водной среды. Такой уровень звукового давления был выбран потому, что, во-первых, естественный уровень акустического шума в районе проведения эксперимента составлял в среднем 35 дБ (отн. 20 мкПа) над водой и 38 дБ (отн. 20 мкПа) под водой на глубине 2 м; во-вторых, при таком уровне звукового давления звук воспринимается именно слуховой системой и не имеет тактильного воздействия, что показано в ряде исследований (*Levänen et al., 2001; Yau et al., 2010; Bernard et al., 2022*).

Работы проводились два раза в день утром и вечером, когда уровень естественного акустического шума минимален и не превышает 40 Дб (отн. 20 мкПа) над и под водой.

Экспериментальная установка работала в автоматическом режиме по следующей схеме. Оператор перед началом каждого опыта оценивал состояние тюленя и окружающей среды, если все было в норме, то принимал решение о начале работы. В контейнеры (5) заряжались 10 порций рыбы; на смартфоне в блоке управления (4) выбирался тюлень, с которым будет проводиться исследование, и по нажатию кнопки на пульте управления (5) запускалась программа опыта. После запуска оператор отходил от вольера, чтобы тюлень не мог его видеть. Система отсчитывала 30 с, давая человеку возможность удалиться, и запускала первый цикл опытов. Установка в случайном порядке выдерживала интервал времени в диапазоне 10–30 с и подавала звуковой сигнал заданной частоты в течение 3 с; если тюлень в это время нажимал на клавишу (3), то система подавала звуковой бридж-сигнал положительного подкрепления (долгий свист), затем запускала механизм открывания первого контейнера (в дальнейших циклах номер контейнера соответствовал номеру цикла), выдавая тюленю кусочек рыбы. Далее система делала задержку в работе на 10 с, давая тюленю возможность съесть кусочек рыбы, а при подводной работе вдохнуть воздуха, и начинала новый цикл.

Если тюлень нажимал на клавишу, когда звуковой стимул не транслировался, то система подавала звуковой бридж-сигнал наказания (два коротких свиста) и начисляла к времени ожидания "штрафные" 10 с. Пропуск звукового сигнала не наказывался; система выдерживала интервал времени в диапазоне 10–20 с и снова проигрывала тот же звуковой сигнал.

Проведя 10 циклов, система делала перерыв в опыте, переходила в режим ожидания и посылала оператору голосовое послание, дублируя его миганием индикаторной лампы на пульте управления (5). Оператор возвращался к вольеру, оценивал состояние тюленя и принимал решение о продолжении или окончании опытов.

Система самостоятельно прекращала опыт в двух случаях: 1) если тюлень начинал бессистемно нажимать или удерживать нажатой клавишу, то каждые 2 с ему начислялись "штрафные" 10 с; при наборе суммарного времени ожидания более 120 с система прекращала опыт и посылала оператору соответствующее звуковое сообщение; 2) если тюлень более 5 раз подряд игнорировал подачу звукового сигнала, то система также прекращала текущий опыт и сигнализировала оператору.

### Результаты и обсуждение

С каждым исследуемым тюленем для каждой демонстрируемой частоты проводили по 100 опытов в воздушной и водной среде. Результаты в виде средних значений времени реакции на звуковой стимул представлены на рис. 2.

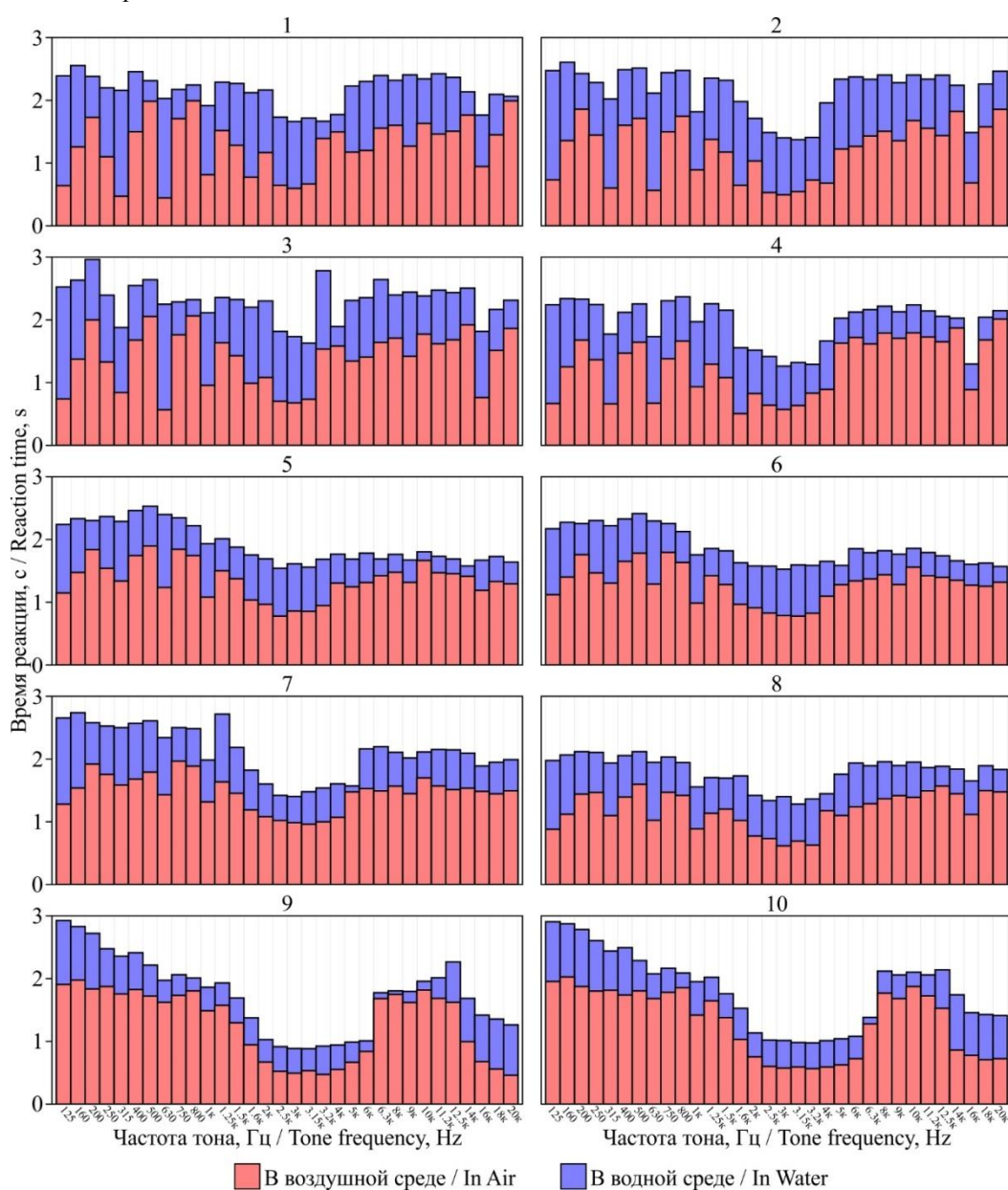


Рис. 2. Индивидуальные аудиограммы серых тюленей  
Fig. 2. Individual audiograms of grey seals



Индивидуальные аудиограммы исследованных серых тюленей показали, что животные подразделяются на пять групп.

В первую группу входили 15-летние самки, при этом для выборок на частоте 4 кГц они подразделялись на две подгруппы: 1) тюлени 1 и 3; 2) тюлени 2 и 4.

Во вторую группу входили 5-летние самки; их внутригрупповые отличия на всем диапазоне частот были минимальны; от группы 15-летних самок они отличались большим временем реакции и более плавным изменением времени реакции при использовании соседних частот.

Третью "группу" представлял 5-летний самец, который отличался от тюленей второй группы более коротким временем реакции, от тюленей первой группы – более плавным изменением времени реакции при использовании соседних частот (характерным для тюленей его возраста).

Молодые 6-месячные тюлени образовывали четвертую группу, наибольшим отличием от остальных групп являлась большая величина стандартного отклонения на всех частотах [кроме частот 2–4 кГц и 14 кГц и выше, где величина стандартного отклонения была соизмерима с другими группами (диапазон 2–4 кГц) или была меньше (диапазон от 14 кГц и выше), в этих же диапазонах время реакции было значительно ниже, чем у тюленей других групп].

Экспериментально установлено, что начиная с частоты 12,5 кГц у 15-летних самок время реакции возрастает, 5-летних – незначительно снижается, 6-месячных – резко уменьшается. Данные тренды различаются по причине снижения с возрастом верхнего предела воспринимаемых частот, что описано в ряде исследований (*Schusterman et al., 2002; Cunningham et al., 2016; D'Agnesse et al., 2021*).

Время реакции всех исследованных тюленей в воздухе меньше, чем время реакции под водой, но при этом разница значений в большинстве случаев константна и составляет около 1 с (у 15-летних тюленей), 0,5–0,7 с (у 5-летних, независимо от пола) и 0,2–0,5 с (у 6-месячных тюленей). Меньшую разницу между временем реакции в воздухе и под водой у молодых тюленей можно объяснить их меньшим весом и линейными размерами, что позволяет быстрее передвигаться под водой. Анализ видеопrotocolов показал, что время между началом подачи звукового сигнала и моментом, когда тюлень начинает движение, в среднем одинаково для идентичных частот в воздушной и водной среде.

Следует отметить, что на определенных частотах время реакции в воздухе и под водой значительно различалось.

Так, 15-летние тюлени очень быстро (относительно соседних частот) реагировали на звуки с частотами 125, 315 и 630 Гц в воздухе и менее быстро – под водой (кроме тюленей 3 и 4, у которых время реакции на данных частотах под водой значительно отличалось от соседних частот). У 5-летних и 6-месячных тюленей такой тенденции выявлено не было. Данную особенность можно объяснить разницей в размерах: у 15-летних тюленей ушной обхват черепа на момент начала эксперимента составлял в среднем  $560 \pm 15$  мм, у 5-летних самок –  $520 \pm 11$  мм, у 5-летнего самца – 540 мм, у 6-месячных – 450 и 470 мм. Эти различия, вероятно, приводили к разным размерам слухового канала, поэтому у взрослых тюленей данные частоты резонировали и, соответственно, усиливались.

В ходе экспериментов выявлена более быстрая (относительно соседних частот) реакция 15-летних тюленей и 5-летнего самца на звук с частотой тона 16 кГц как в воздухе, так и под водой. Этот факт можно объяснить реакцией на хлопки ластами, характерные для половозрелых самцов серого тюленя в период размножения, частотный пик которых приходится именно на 16 кГц (*Hocking et al., 2020*). Данные звуки имеют биологическое значение для половозрелых 15-летних самок, связанное с поиском партнера для спаривания, а для 5-летнего самца, находящегося в начале полового созревания (*Boness et al., 1979; Beest et al., 2019*), – с возможностью избежать встречи с крупными половозрелыми самцами, чем и обусловлено быстрое время реакции на звук чистого тона с частотой 16 кГц.

При использовании средних частот 1–4 кГц у всех тюленей в воздушной и водной среде отмечается самое быстрое время реакции. В этом диапазоне находятся гортанные рыки, издаваемые серыми тюленями как на суше, так и в воде, и щелчки, фиксируемые только под водой. Ряд авторов (*Asselin et al., 1993; Miksis-Olds et al., 2016; Nowak, 2021*) предполагают, что именно эти звуки являются основными коммуникативными сигналами, имеющими амплитудно-темпоральную модуляцию на индивидуальной для каждой особи частоте (форманте), обычно находящейся в пределах 2–3,5 кГц для серых тюленей (*Stansbury et al., 2019*).

Изменения на данных частотах у 5-летних тюленей выражены нечетко, в то время как у 6-месячных и 15-летних на данном диапазоне частот время реакции значительно отличается от более низких и более высоких частот. У 6-месячных тюленей наиболее быстрая реакция фиксируется при применении частот 2–6 кГц, 15-летние тюлени 1 и 3 демонстрируют наиболее быструю реакцию на частотах 3–3,2 кГц, тюлени 2 и 4 имеют более широкий диапазон – 1,6–4 кГц. При этом оба молодых тюленя были рождены и выкармливались 15-летней самкой 4, а самка 2 рожала щенка, но не выкармливала его (*Zaytsev et al., 2021*). Также у рожавших самок время реакции на частоты 3; 3,1 и 3,2 кГц меньше, чем у яловых самок 1 и 3. Данный факт можно объяснить физиологическими изменениями тюленей 2 и 4, связанными с рождением и выкармливанием

щенков. Согласно ряду исследований, посвященных вокализации серых тюленей в период лактации (Caudron *et al.*, 1998; Stansbury *et al.*, 2021), коммуникация самки со щенком происходит на частотах 3–4 кГц.

### Заключение

В результате исследования получены индивидуальные аудиограммы серых тюленей в воздушной и водной среде. Аудиограммы, основанные на времени реакции, имеют зависимость от возрастов испытуемых тюленей: для молодых тюленей характерен более ровный график, время реакции на соседние частоты возрастает и убывает более плавно, чем у взрослых тюленей, на аудиограммах которых наблюдаются скачкообразные переходы. Под водой относительная разница во времени реакции на соседние частоты ниже, чем в воздушной среде на аналогичные частоты. При использовании частот среднего спектра, которые серые тюлени используют для коммуникации, время реакции значительно меньше, чем остальных частот. В ходе экспериментов выявлены частоты (125, 315 и 630 Гц), время реакции на которые при восприятии в воздушной среде значительно меньше, чем на соседние частоты, что особенно четко проявляется у 15-летних тюленей, слабо выражено у 5-летних тюленей и не наблюдается у 6-месячных тюленей. При восприятии данных частот в воде резкие отличия во времени реакции наблюдаются только у рожавших 15-летних самок. В верхней части спектра предъявляемых частот внимание привлекает 16 кГц, быстрая реакция на которую четко выражена у всех 15-летних тюленей как в воздушной среде, так и в водной; снижение скорости реакции выражено у 5-летнего самца; быстрая реакция не наблюдается ни у 5-летних самок, ни у молодых тюленей.

Полученные данные и опыт могут служить основой для проведения дальнейших исследований с использованием электрографических методов фиксации времени реакции, исключая влияние различий во времени, затрачиваемом тюленями на совершение движения нажатия на клавишу: электромиографии или метода вызванных потенциалов спинного мозга (Ruser *et al.*, 2014).

### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Библиографический список

- Литвинов Ю. В., Пахомов М. В. Исследование способности серых тюленей дифференцировать сложносоставные звуковые сигналы // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 2. С. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257>. EDN: LXVVVZ.
- Литвинов Ю. В., Пахомов М. В., Зайцев А. А., Трошичев А. Р. Исследование возможности применения времени реакции на звуковой раздражитель в качестве показателя сенсомоторной реакции у серых тюленей // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2022. № 4. С. 59–67. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-4-59-67](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-4-59-67). EDN: LRRTBI.
- Пахомов М. В., Зайцев А. А. Исследование длинноволновой границы спектральной чувствительности у серого тюленя *Halichoerus grypus* (Fabricius, 1791) // Морской биологический журнал. 2022. Т. 7, № 4. С. 46–54. DOI: [10.21072/mbj.2022.07.4.04](https://doi.org/10.21072/mbj.2022.07.4.04). EDN: EBVGDG.
- Asselin S., Hammil M. O., Barrette C. Underwater vocalizations of ice breeding grey seals // Canadian Journal of Zoology. 1993. Vol. 71, Iss. 11. P. 2211–2219. DOI: <https://doi.org/10.1139/z93-310>.
- Bernard C., Monnoyer J., Wiertelowski M., Ystad S. Rhythm perception is shared between audio and haptics // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. Article number: 4188. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08152-w>.
- Boness D. J., James H. Reproductive behaviour of the Grey seal (*Halichoerus grypus*) on Sable Island, Nova Scotia // Journal of Zoology. 1979. Vol. 188, Iss. 4. P. 477–500. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1979.tb03430.x>.
- Bonner W. N. Seals and man: A study of interactions // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1983. Vol. 63, Iss. 1. P. 245. DOI: [10.1017/S002531540004995X](https://doi.org/10.1017/S002531540004995X).
- Bouveroux T., Kiszka J. J., Heithaus M. R., Jauniaux T. [et al.]. Direct evidence for grey seal (*Halichoerus grypus*) predation and scavenging on harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) // Marine Mammals Science. 2014. Vol. 30, Iss. 4. P. 1542–1548. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12111>.
- Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of Grey seal (*Halichoerus Grypus*) pup calls // Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom. 1998. Vol. 78, Iss. 2. P. 651–658. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315400041680>.
- Cunningham K., Reichmuth C. High-frequency hearing in seals and sea lions // Hearing Research. 2016. Vol. 331. P. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.10.002>.
- D'Agnese E. R., Lambourn D. M., Olson J. K., Huggins J. L. [et al.]. Congenital diseases in harbor seals (*Phoca vitulina richardsii*) from the Salish Sea // Journal of Wildlife Diseases. 2021. Vol. 57, Iss. 3. P. 672–677. DOI: <https://doi.org/10.7589/jwd-d-20-00179>.

- Harris C. M., Thomas L., Falcone E. A., Hildebrand J. [et al.]. Marine mammals and sonar: Dose-response studies, the risk-disturbance hypothesis and the role of exposure context // *Journal of Applied Ecology*. 2018. Vol. 55, Iss. 3. P. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12955>.
- Hocking D. P., Burville B., Parker W. M. G., Evans A. R. [et al.]. Percussive underwater signaling in wild grey seals // *Marine Mammals Science*. 2020. Vol. 36, Iss. 2. P. 728–732. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12666>.
- Johnson S. R., Burns J. J., Malme C. I., Davis R. A. 1989. Synthesis of information on the effects of noise and disturbance on major haulout concentrations of Bering Sea pinnipeds. US Department of the Interior, Minerals Management Service. 266 p. Report No.: OCS Study MMS 88-0092. URL: <https://epis.boem.gov/Final%20Reports/4994.pdf>.
- Levänen S., Hamdorf D. Feeling vibrations: Enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans // *Neuroscience Letters*. 2001. Vol. 301, Iss. 1. P. 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01597-X).
- Martin M., Gridley T., Elwen S. H., Charrier I. Assessment of the impact of anthropogenic airborne noise on the behaviour of Cape fur seals during the breeding season in Namibia // *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 2022. Vol. 550. Article number: 151721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151721>.
- Miksis-Olds J. L., Van Opzeeland I. C., Van Parijs S. M., Jones J. Pinniped sounds in the Polar Oceans. In: Au, W., Lammers, M. (eds.) *Listening in the Ocean. Modern Acoustics and Signal Processing*. Springer, New York, NY. 2016. P. 257–308. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7_11).
- Nowak L. J. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals // *Bioacoustics*. 2021. Vol. 30, Iss. 6. P. 696–715. DOI: <https://doi.org/10.1080/09524622.2020.1851298>.
- Ruser A., Dähne M., Sundermeyer J., Lucke K. [et al.]. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas // *PLoS One*. 2014. Vol. 9, Iss. 3. Article number: e90824. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090824>.
- Schusterman R. J., Southall B., Kastak D., Kastak C. R. Age-related hearing loss in sea lions and their scientists // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002. Vol. 111, Iss. 5. P. 2342–2343. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4777841>.
- Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *Journal of Experimental Biology*. 2015. Vol. 218, Iss. 14. P. 2250–2259. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.120972>.
- Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *Journal of Experimental Biology*, 2014. Vol. 217, Iss. 5. P. 726–760. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.097469>.
- Stansbury A. L., Janik V. M. Formant modification through vocal production learning in Grey seals // *Current Biology*. 2019. Vol. 29, Iss. 13. P. 2244–2249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.071>.
- Stansbury A. L., Janik V. M. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups // *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2021. Vol. 376, Iss. 1836. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0251>.
- Van Beest F. M., Mews S., Elkenkamp S., Schuhmann P. Classifying grey seal behaviour in relation to environmental variability and commercial fishing activity – a multivariate hidden Markov model // *Scientific Reports*. 2019. Vol. 9. Article number: 5642. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42109-w>.
- Wiggins S. M., Krumpel A., Dorman L. M., Hildebrand J. A. [et al.]. Seal bomb explosion sound source characterization // *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2021. Vol. 150. P. 1821–1829. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0006101>.
- Wilson J. C., Elliott M., Cutts N. D., Mander L. [et al.]. Coastal and offshore wind energy generation: Is it environmentally benign? // *Energies*. 2010. Vol. 3, Iss. 7. P. 1383–1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/en3071383>.
- Yau J. M., Weber A. I., Bensmaia S. J. Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions // *Frontiers in Psychology*. 2010. Vol. 1. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00160>.
- Zaytsev A. A., Litvinov Y. V., Pahomov M. V., Troshichev A. R. [et al.]. Birth of a *Halichoerus grypus* Atlantica (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS // *Aquatic Mammals*. 2021. Vol. 47, Iss. 1. P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.1578/am.47.1.2021.36>.

## References

- Litvinov, Yu. V., Pakhomov, M. V. 2019. Investigation of the ability of grey seals to differentiate composite audio signals. *Vestnik of MSTU*, 22(2), pp. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257>. EDN: LXVVVZ. (In Russ.)
- Litvinov, Yu. V., Pakhomov, M. V., Zaytsev, A. A., Troshichev A. R. 2022. Investigation of the possibility of using the reaction time to a sound stimulus as an indicator of sensorimotor reaction in grey seals. *Izvestiya Tula State University*, 4, pp. 59–67. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-4-59-67](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-4-59-67). EDN: LRRTBI. (In Russ.)



- Pakhomov, M. V., Zaytsev, A. A. 2022. Investigation of the long-wavelength threshold of spectral sensitivity in the grey seal *Halichoerus grypus* (Fabricius, 1791). *Marine Biological Journal*, 7(4), pp. 46–54. DOI: 10.21072/mbj.2022.07.4.04. EDN: EBVGDG. (In Russ.)
- Asselin, S., Hammil, M. O., Barrette, C. 1993. Underwater vocalizations of ice breeding grey seals. *Canadian Journal of Zoology*, 71(11), pp. 2211–2219. DOI: <https://doi.org/10.1139/z93-310>.
- Bernard, C., Monnoyer, J., Wiertelowski, M., Ystad, S. 2022. Rhythm perception is shared between audio and haptics. *Scientific Reports*, 12. Article number: 4188. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08152-w>.
- Boness, D. J., James, H. 1979. Reproductive behaviour of the Grey seal (*Halichoerus grypus*) on Sable Island, Nova Scotia. *Journal of Zoology*, 188(4), pp. 477–500. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.1979.tb03430.x>.
- Bonner, W. N. 1983. Seals and man: A study of interactions. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 63(1), pp. 245. DOI: 10.1017/S002531540004995X.
- Bouveroux, T., Kiszka, J. J., Heithaus, M. R., Jauniaux, T. et al. 2014. Direct evidence for grey seal (*Halichoerus grypus*) predation and scavenging on harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). *Marine Mammals Science*, 30(4), pp. 1542–1548. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12111>.
- Caudron, A. K., Kondakov, A. A., Siryanov, S. V. 1998. Acoustic structure and individual variation of Grey seal (*Halichoerus Grypus*) pup calls. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 78(2), pp. 651–658. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0025315400041680>.
- Cunningham, K., Reichmuth, C. 2016. High-frequency hearing in seals and sea lions. *Hearing Research*, 331, pp. 83–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heares.2015.10.002>.
- D'Agnese, E. R., Lambourn, D. M., Olson, J. K., Huggins, J. L. et al. 2021. Congenital diseases in harbor seals (*Phoca vitulina richardsii*) from the Salish Sea. *Journal of Wildlife Diseases*, 57(3), pp. 672–677. DOI: <https://doi.org/10.7589/jwd-d-20-00179>.
- Harris, C. M., Thomas, L., Falcone, E. A., Hildebrand, J. et al. 2018. Marine mammals and sonar: Dose-response studies, the risk-disturbance hypothesis and the role of exposure context. *Journal of Applied Ecology*, 55(3), pp. 396–404. DOI: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12955>.
- Hocking, D. P., Burville, B., Parker, W. M. G., Evans, A. R. et al. 2020. Percussive underwater signaling in wild grey seals. *Marine Mammals Science*, 36(2), pp. 728–732. DOI: <https://doi.org/10.1111/mms.12666>.
- Johnson, S. R., Burns, J. J., Malme, C. I., Davis, R. A. 1989. Synthesis of information on the effects of noise and disturbance on major haulout concentrations of Bering Sea pinnipeds. US Department of the Interior, Minerals Management Service. Report No.: OCS Study MMS 88-0092. URL: <https://epis.boem.gov/Final%20Reports/4994.pdf>.
- Levänen, S., Hamdorf, D. 2001. Feeling vibrations: Enhanced tactile sensitivity in congenitally deaf humans. *Neuroscience Letters*, 301(1), pp. 75–77. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0304-3940\(01\)01597-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3940(01)01597-X).
- Martin, M., Gridley, T., Elwen, S. H., Charrier, I. 2022. Assessment of the impact of anthropogenic airborne noise on the behaviour of Cape fur seals during the breeding season in Namibia. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 550. Article number: 151721. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2022.151721>.
- Miksis-Olds, J. L., Van Opzeeland, I. C., Van Parijs, S. M., Jones, J. 2016. Pinniped sounds in the Polar Oceans. In Au, W., Lammers, M. (eds.) *Listening in the Ocean. Modern Acoustics and Signal Processing*. Springer, New York, NY. P. 257–308. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7\\_11](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3176-7_11).
- Nowak, L. J. 2021. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals. *Bioacoustics*, 30(6), pp. 696–715. DOI: <https://doi.org/10.1080/09524622.2020.1851298>.
- Ruser, A., Dähne, M., Sundermeyer, J., Lucke, K. et al. 2014. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas. *PLoS One*, 9(3). Article number: e90824. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0090824>.
- Schusterman, R. J., Southall, B., Kastak, D., Kastak, C. R. 2002. Age-related hearing loss in sea lions and their scientists. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 111(5), pp. 2342–2343. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.4777841>.
- Sills, J. M., Southall, B. L., Reichmuth, C. 2015. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. *Journal of Experimental Biology*, 218(14), pp. 2250–2259. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.120972>.
- Sills, J. M., Southall, B. L., Reichmuth, C. 2014. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): Underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. *Journal of Experimental Biology*, 217(5), pp. 726–760. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.097469>.
- Stansbury, A. L., Janik, V. M. 2019. Formant modification through vocal production learning in Grey seals. *Current Biology*, 29(13), pp. 2244–2249. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.05.071>.
- Stansbury, A. L., Janik, V. M. 2021. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 376(1836). DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0251>.

- Van Beest, F. M., Mews, S., Elkenkamp, S., Schuhmann, P. 2019. Classifying grey seal behaviour in relation to environmental variability and commercial fishing activity – a multivariate hidden Markov model. *Scientific Reports*, 9. Article number: 5642. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-42109-w>.
- Wiggins, S. M., Krumpel, A., Dorman, L. M., Hildebrand, J. A. et al. 2021. Seal bomb explosion sound source characterization. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 150, pp. 1821–1829. DOI: <https://doi.org/10.1121/10.0006101>.
- Wilson, J. C., Elliott, M., Cutts, N. D., Mander, L. et al. 2010. Coastal and offshore wind energy generation: Is it environmentally benign? *Energies*, 3(7), pp. 1383–1422. DOI: <https://doi.org/10.3390/en3071383>.
- Yau, J. M., Weber, A. I., Bensmaia, S. J. 2010. Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions. *Frontiers in Psychology*, 1. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2010.00160>.
- Zaytsev, A. A., Litvinov, Y. V., Pahomov, M. V., Troshichev, A. R. et al. 2021. Birth of a *Halichoerus grypus* Atlantica (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquaculture complex of MMBI RAS. *Aquatic Mammals*, 47(1), pp. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.1578/am.47.1.2021.36>.

#### Сведения об авторах

**Пахомов Мирон Владимирович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, науч. сотрудник;  
e-mail: [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

**Miron V. Pakhomov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Researcher;  
e-mail: [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

**Зайцев Александр Алексеевич** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, науч. сотрудник;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

**Alexandr A. Zaytsev** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Researcher;  
e-mail: [yanmos@yandex.ru](mailto:yanmos@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

**Литвинов Юрий Владимирович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

**Yuri V. Litvinov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Junior Researcher; e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

**Трошичев Александр Родионович** – ул. Владимирская, 17, Мурманск, Россия, 183038;  
Мурманский морской биологический институт РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [troshich@mail.ru](mailto:troshich@mail.ru)

**Alexandr R. Troshichev** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183038;  
Murmansk Marine Biological Institute RAS (MMBI RAS), Junior Researcher; e-mail: [troshich@mail.ru](mailto:troshich@mail.ru)