

Научная статья
УДК 57.024+57.084.2
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.2.011

РЕЗУЛЬТАТЫ ЛЕТНЕЙ ТОНАЛЬНОЙ АУДИОМЕТРИИ СЕРЫХ ТЮЛЕНЕЙ

**Мирон Владимирович Пахомов, Александр Алексеевич Зайцев,
Андрей Петрович Яковлев, Александр Родионович Трошичев,
Юрий Владимирович Литвинов**

Мурманский морской биологический институт Российской академии наук, г. Мурманск, Россия
pachomov@mmbi.info, zaytsev@mmbi.info, yakovlev@mmbi.info,
troshichev@mmbi.info, litvinov@mmbi.info

Аннотация

Летом 2020–2024 гг. у самок серых тюленей методом тональной аудиометрии выполнены работы по проверке слуха. В качестве акустического стимула использовали звук синусоидальной формы чистого тона одной из 32 частот, рекомендованных для проведения пороговой тональной аудиометрии. Установлено, что у рожающих самок тюленей время реакции на звуки с частотой 2, 2.5, 3.15, 3.2 и 4 кГц значительно меньше, чем у нерожающих.

Ключевые слова:

серый тюлень, слух, аудиометрия, беременность, щенок

Original article

RESULTS OF SUMMER TONAL AUDIOMETRY OF GRAY SEALS

**Miron V. Pakhomov, Alexander A. Zaytsev, Andrey P. Yakovlev,
Alexander R. Troshichev, Yuri V. Litvinov**

Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russia
pachomov@mmbi.info, zaytsev@mmbi.info, yakovlev@mmbi.info,
troshichev@mmbi.info, litvinov@mmbi.info

Abstract

In the summer of 2020–2024, female gray seals underwent hearing testing using tonal audiometry. A sinusoidal sound of a pure tone was used as an acoustic stimulus, one of the 32 frequencies recommended for threshold tonal audiometry. It was found that the reaction time to sounds with frequencies of 2, 2.5, 3.15, 3.2 and 4 kHz was significantly shorter in female seals who gave birth than in those who did not give birth.

Keywords:

grey seal, hearing, audiometry, pregnancy, puppy

Введение

Серые тюлени *Halichoerus grypus* Fabricius, 1791 используют акустические сигналы для общения как в воздухе, так и под водой. В воздухе они редко издают коммуникационные сигналы, но под водой у них богатый «вокальный репертуар» (Nowak, 2020). Возможно, тюлени не так сильно зависят от своей слуховой системы, чтобы выжить во взрослом состоянии (Hidrodynamic ..., 2001), но воспроизведение и восприятие звуков важны при общении матери и детеныша, а также в брачных играх животных (Dudzinski et al., 2009). Самки серых тюленей часто рожают детенышей в плотных колониях и регулярно оставляют их одних, чтобы отправиться в море, поэтому для них важно взаимное распознавание звуков. Тем не менее, отмечено, что в больших популяциях, таких как крупные лежки серых тюленей на о. Мэй в Шотландии (McCulloch, Boness, 2000) и на о. Большой Лицкий в Баренцевом море (Caudron et al., 1998), самки плохо распознают своих детенышей как по акустическим, так и по обонятельным сигнатурам и часто кормят чужих щенков, в то время как в относительно малых и изолированных популяциях, таких как лежка на о. Сейбл в Новой Шотландии (McCulloch, Boness, 2000) или на Оркнейских островах (Fogden, 1971), самки никогда не подходят к чужим щенкам. Поэтому вопрос акустической коммуникации между щенком и самкой представляет особый интерес, учитывая возрастающую хозяйственную деятельность человека в Арктике, приводящую к увеличению акустической нагрузки на тюленей в период вскармливания, когда мать и щенок наиболее уязвимы.

Наиболее информативным методом исследований слуха ластоногих является аудиография с фиксацией реакции на звуковой стимул определенной частоты (обычно из стандартного и расширенного наборов). Реакцию фиксируют либо с помощью поведенческих паттернов (The effect ..., 2010; Sills et al., 2014, 2015), либо методом вызванных потенциалов спинного мозга (In-air ..., 2014). Таким образом получены аудиограммы обыкновенных тюленей *Phoca vitulina* Linnaeus, 1758 (The effect ..., 2010), лагр *Phoca largha* Pallas, 1811 (Sills et al., 2015), кольчатых нерп *Pusa hispida* Schreber, 1775 (Sills et al., 2014) и серых тюленей (In-air ..., 2014). Но вышеперечисленные исследования носили разовый характер с неполовозрелыми особями. Для изучения влияния беременности, родов и последующего вскармливания необходимо сравнение аудиограмм самки тюленя до беременности, во время беременности и после родов. Это представляет значительные трудности, так как фактически невозможно в течение долгого времени отслеживать аудиограммы диких тюленей, а в условиях неволи случаи рождения серых тюленей единичны и не прогнозируемы. Сложности возникают также с измерением показателей слуха. Согласно стандартной методике проведения тональной аудиометрии, пороговым показателем слуха является минимальное звуковое давление, при котором фиксируется реакция на звуковой раздражитель. В подавляющем большинстве исследований слуха ластоногих используется именно этот показатель. Но по методике требуется обеспечить звукоизоляцию испытуемого от воздействия внешних акустических шумов. Это можно достичь помещением испытуемого в изолированное помещение. Например, исследовали слух обыкновенных тюленей (The effect ..., 2010), лагр (Sills et al., 2015) и кольчатых нерп (Sills et al., 2014), где эксперименты проводили в специальном помещении, оборудованном бассейном. Достичь звукоизоляции можно и с помощью специальных наушников, либо введением звуководных зондов в слуховой канал. Последние использовали при исследовании слуха балтийских серых тюленей (In-air ..., 2014).

Следует отметить, что при подготовке к проведению данной работы осуществлялись попытки надеть на тюленя накладные полноразмерные звукоизолирующие наушники разных конструкций. При этом было отмечено, что если амбушюры наушников слабо прилегали к голове, то они не выполняли звукоизолирующей функции. Если же прилегали плотно, то у тюленя рефлекторно запирались слуховые каналы. В условиях открытого вольерного комплекса было затруднительно поместить исследуемого тюленя в звукоизолированное помещение, оборудованное достаточно просторным и глубоким бассейном. В то же время, некоторые исследования продемонстрировали достоверную корреляционную зависимость между значениями минимального звукового давления и величиной времени реакции на звук чистого тона одинаковой частоты (Schlittenlacher, Ellermeier, 2015), что позволяет использовать время реакции вместо минимального звукового давления при проведении аудиометрических исследований.

В декабре 2019 г. 15-летняя самка, содержащаяся на аквакомплексе ММБИ РАН (г. Полярный) родила, а затем успешно выкормила щенка (Birth ..., 2021). При проведении аудиометрии по частотам стандартного и расширенного диапазона летом 2020 г. было установлено, что у данной самки, а также у другой особи, которая рожала, но не выкармливала, скорость реакции на частоты в 3.0, 3.1 и 3.2 кГц достоверно выше, чем у двух яловых сверстниц (Применение ..., 2023). В связи с этим, а также для общего ветеринарного обследования и с учетом высокой вероятности беременности других самок было принято решение проводить данное исследование каждое лето. В январе 2024 г. молодая самка в возрасте 8 лет родила и раскормила щенка.

Материал и методы

С июня 2020 г. 6 самок серого тюленя, находящихся в аквакомплексе Института (г. Полярный), проходили в течение лета процедуру аудиометрии. Все исследуемые животные принадлежат одной популяции и были отловлены на о. Большой Кий в декабре 2005 г. (им дали название «зрелые») и 2016 г. («молодые») тюлени были условно разделены на две группы, в каждую входила рожавшая самка и две нерожавшие сверстницы. На начало работ (июнь 2020 г.) возраст самок в группе «зрелые» составлял 15 лет, в группе «молодые» – 4 года.

Исследования проводили на разработанной в лаборатории морских млекопитающих ММБИ автоматической установке (рис. 1; Применение ..., 2023). Тюленьям демонстрировались 32 чистых тона из стандартного и расширенного наборов частот рекомендованных для проведения тональной пороговой аудиометрии под номерами: 1 – 125 Гц, 2 – 160 Гц, 3 – 200 Гц, 4 – 250 Гц, 5 – 315 Гц, 6 – 400 Гц, 7 – 500 Гц, 8 – 630 Гц, 9 – 750 Гц, 10 – 800 Гц, 11 – 1000 Гц, 12 – 1250 Гц, 13 – 1500 Гц, 14 – 1600 Гц, 15 – 2000 Гц, 16 – 2500 Гц, 17 – 3000 Гц, 18 – 3150 Гц, 19 – 3200 Гц, 20 – 4000 Гц, 21 – 5000 Гц, 22 – 6000 Гц, 23 – 6300 Гц, 24 – 8000 Гц, 25 – 9 кГц, 26 – 10 кГц, 27 – 11.2 кГц, 28 – 12.5 кГц, 29 – 14 кГц, 30 – 16 кГц, 31 – 18 кГц, 32 – 20 кГц.

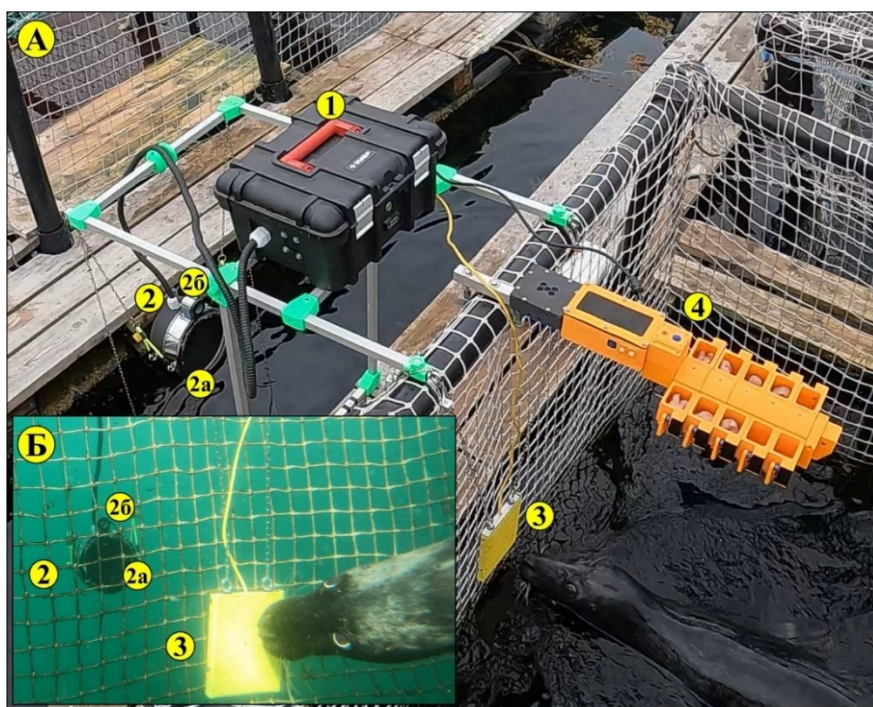


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в надводном (А) и подводном (Б) положении:
1 – блок питания, генерации и усиления звукового сигнала; 2 – блок динамиков (2а – низкочастотный, 2б – высокочастотный);
3 – клавиша для взаимодействия с тюленем; 4 – система автоматической подачи пищевого поощрения
Fig. 1. Experimental installation scheme in the air environment (A) and in the aquatic environment (B):
1 – power, generation and amplifying unit; 2 – acoustic speaker's complex (2a – low frequency, 2b – hi frequency); 3 – key for interacting with a seal; 4 – automatic food promotion system

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 передавался на усилитель Ural BV 2.70. Звуки на частотах до 1000 Гц включительно воспроизводились на подводной колонке Aquasonic AQ339 (2а), звуки на частотах свыше 1000 Гц – с помощью акустического излучателя на основе пьезоэлектрической диафрагмы SVC2065BAL (2б). Блок динамиков (2) и клавишу (3) размещали на высоте 30 см от уровня воды и под водой на глубине 2 м на расстоянии 1 м друг от друга в воздухе.

В качестве показателя реакции использовалась разница во времени между началом демонстрации звука и нажатием животного на клавишу (3). Уровень звукового давления был постоянен и составлял 50 дБ (отн. 20 мкПа) на расстоянии 1 м от источника для всех используемых частот как в воздушной, так и в водной среде. Значение уровня звукового давления в 50 дБ было выбрано нами потому, что данный уровень значительно выше такового естественного шума в районе проведения работ, составляющего в среднем 34.28 дБ в воздушной среде и 38.12 дБ в водной.

Работы проводили 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, масса одной порции рассчитывалась индивидуально для каждого тюленя. Когда звуковой сигнал не воспроизводился, но тюлень нажимал на клавишу, 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 временной интервал в диапазоне 10–20 с и снова проигрывала звуковой сигнал. Полученные данные микроконтроллер записывал на SD-карту, формируя файл протокола тренировки каждого тюленя.

Работы выполнялись с июня по сентябрь два раза в сутки – утром (с 6:00 до 8:00) и вечером (с 20:00 до 22:00), когда уровень естественного акустического шума минимален и не превышает 40 Дб (отн. 20 мкПа) над и под водой. К исследованиям приступали в солнечную или облачную погоду при отсутствии осадков или тумана, так как данные факторы являются источниками шума, влияют на распространение акустического сигнала и непосредственно на физиологический статус исследуемых животных. Для контроля погодных условий, влияющих на распространение звуковой волны в среде, перед проведением каждого эксперимента проводили измерения температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности с помощью портативной метеостанции Brunton ADC Pro и температуры воды на глубине 2 м с помощью электронного термометра с выносным датчиком Espada TPM-10. Полученные данные вносились в протокол тренировки.

Для статистической обработки данных был написан скрипт в среде разработки IDLE (Integrated Development and Learning Environment) на языке программирования Python версии 3.12.0 с использованием пакета stats в составе библиотеки SciPy. Скрипт считывал данные из файлов протоколов тренировок, формировал для каждого исследуемого тюленя выборки по каждой демонстрируемой частоте, проводил статистическую обработку и с помощью управления API-функциями строил диаграмму в графическом редакторе векторной графики CorelDRAW 2017 (64-bit). В статистическую обработку входило определение нормальности распределения для выборок с помощью теста Шапиро-Уилка, выявление корреляций между значениями времени реакции на определенную частоту и измеряемыми погодными параметрами с помощью коэффициента ранговой корреляции Спирмена, попарное сравнение выборок по критерию Манна-Уитни. Если по критерию Манна-Уитни при критическом уровне значимости 0.05 выборки предыдущего и текущего лета достоверно не отличались, то такая пара отображалась прямой линией, если выборки достоверно отличались – в виде треугольника, где основанием было медианное значение выборки предыдущего лета, а вершиной – медианное значение выборки текущего лета.

Результаты и обсуждение

Для каждого исследуемого тюленя были получены 320 выборок по 100 опытов в каждой для всех 32 демонстрируемых частот в воздушной и водной средах в летний период 2020–2024 гг. Влияния измеряемых погодных показателей на результаты опытов не отмечено. Для демонстрируемых частот годовые выборки сравнивались по критерию Манна-Уитни с критическим уровнем значимости 0.05. Результаты анализа представлены на рис. 2, где для каждой частоты отображены летние медианные значения выборок.

У молодой рожавшей самки (тюлень № 1) отчетливо видно уменьшение времени реакции в летний период 2022, 2023 и 2024 гг. по частоте 2.5, 3, 3.15, 3.2 и 4 кГц. Однако время реакции не изменялось летом 2020, 2021, 2022 и 2023 гг. При этом летом 2022 и 2023 гг. отмечалось небольшое уменьшение времени реакции, в 2024 г. наблюдалось интенсивное уменьшение времени реакции, особенно на частоте 4 кГц – с 1.1 с в 2022 г. до 0.64 с в 2024 г. У ее ровесниц было зафиксировано незначительное уменьшение времени реакции летом 2020 и 2021 гг. на частотах 3 и 3.2 у тюленя № 1 и на частоте 2.5 кГц у тюленя № 5. В последующие годы изменений времени реакции зафиксировано не было. Следует отметить, что рожавшая самка № 1 изначально имела более быструю реакцию на большинство частот, летом 2024 г. время реакции на частоты в диапазоне 2.5–4 кГц стало приблизительно равно времени реакции многократно рожавшей самки № 2.

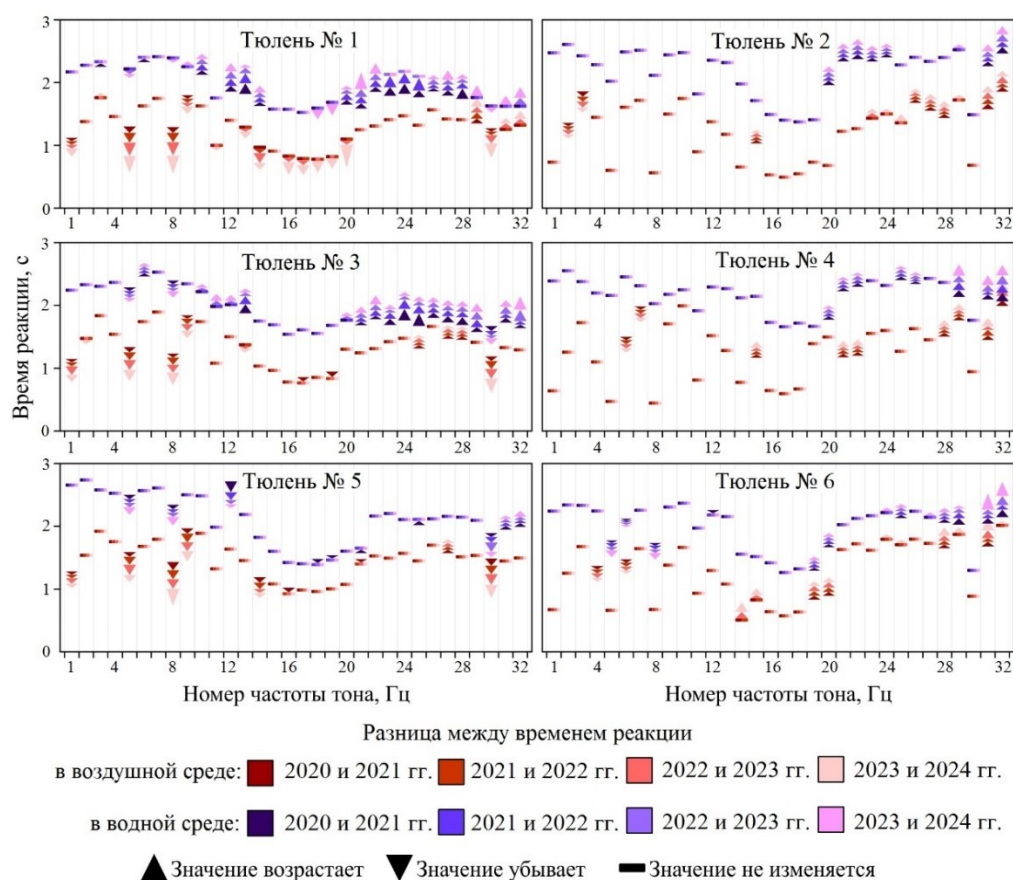


Рис. 2. Индивидуальные аудиограммы серых тюленей в летний период с 2020 по 2024 гг.
Fig. 2. Individual audiograms of gray seals in the summer period from 2020 to 2024

У группы «зрелых» самок (тюлени № 2, 4, 6) за весь период исследований изменений времени реакции на частоты 2.5, 3 и 3.15 не зафиксировано. Но время реакции на данные частоты у рожавшей самки (тюлень № 2) стабильно ниже, чем у нерожавших ровесниц. У всех «зрелых» самок зафиксировано постепенное увеличение времени реакции на частоту 2 кГц и заметная разница во времени реакции на частоты 3.2 и 4 кГц: у рожавшей самки № 1 время реакции на данные частоты значительно ниже, чем у самок № 4 и № 6, при этом, у самки № 6, время реакции которой изначально было ниже, чем у самки № 4, постепенно увеличилось во время исследований до сопоставимых с самкой № 4 значений.

Как мы указывали выше, все исследуемые самки принадлежат небольшой популяции, обитающей в районе Кийских островов, входящих в гряду Айновых островов, и насчитывает около 150–300 особей (The status ..., 1994), поэтому можно предположить, что самки данной популяции способны отличать собственных щенков от чужих. Согласно исследованиям, посвященных вокализации серых тюленей в период лактации, представленных в аналитической работе А. К. Каудрона и соавторов (Caudron et al., 1998), коммуникация самки со щенком происходит на частотах 3–4 кГц. Снижение времени реакции на звук с частотой 4 кГц, вероятно, можно объяснить возможностью кормящей самки реагировать на крики чаек, у которых в спектре криков присутствует пик на частотах близких к 4 кГц (Burton et al., 1975). Учитывая, что самка № 1 родила щенка в начале января 2024 г. и тот факт, что беременность у серых тюленей протекает около 11 мес., можно предположить, что зачатие произошло в феврале 2023 г. Таким образом, на момент начала проведения аудиометрических процедур в июле 2023 г. самка была на 7 месяце беременности. При этом снижение времени реакции в летние месяцы 2022 и 2023 гг. было значительно меньше, чем между 2023 и 2024 гг., но больше, чем разница между 2020 и 2021 гг., а также между 2021 и 2022 гг., что позволяет предположить, что изменения слуха происходят либо после рождения, либо на поздних стадиях

беременности. Такие изменения слуха на поздних стадиях беременности зафиксированы и хорошо изучены у человека, экспериментально доказаны у крыс, птиц, рыб и бесхвостых земноводных. Главной причиной является резкое повышение уровня эстрогенов и в первую очередь прогестерона, который воздействует как на тонус волосковых клеток во внутреннем ухе, так и на нейроны слуховых центров головного мозга (Caras, 2013).

У всех исследуемых животных зафиксировано значительное увеличение времени реакции на частоты 18 и 20 кГц в водной среде. В воздушной среде увеличение времени реакции зарегистрировано только у взрослых самок, у молодых животных изменений на данных частотах не наблюдалось. У молодых самок отмечено постепенное увеличение времени реакции на частоты выше 5 кГц в водной среде за исключением самки № 5, у которой время реакции и так было высоко относительно ровесниц. Можно предположить, что причина заключается в возрастном ухудшении слуха или пресбикузисе, описанном у многих видов млекопитающих, при котором характерно ухудшение слуха, которое обычно начинается на высоких частотах (Haung, Tang, 2010).

Все самки группы «зрелые» обладают стабильно быстрой реакцией на частоты 125, 315, 630, 1000 Гц и 16 кГц. У самок группы «молодые» было отмечено интенсивное снижение времени реакции на данные частоты за весь период исследований как в воздушной, так и в водной среде. Пики на частотах 125, 315, 630 и 1000 Гц присутствуют во многих вокальных сигналах серых тюленей (Dudzinski et al., 2001) и могут являться формантными частотами «местного диалекта» тюленей из одной популяции (Stansbury, Janik, 2021). Быструю реакцию на звук с частотой 16 кГц можно объяснить реакцией на хлопки ластами, характерные для половозрелых самцов серого тюленя в период размножения, частотный пик которых приходится именно на 16 кГц (Percussive ..., 2020). При этом исследования показали, что время реакции у молодых самок постоянно снижается, что можно объяснить их половым созреванием, которое у серых тюленей начинается примерно с 5 лет, когда звуки данной частоты приобретают с каждым годом все большую значимость.

Выводы

Исследования показали, что у рожавших самок серого тюленя время реакции на звуки чистого тона синусоидальной формы с частотами в 2, 2.5, 3.15, 3.2 и 4 кГц значительно ниже, чем у нерожавших сверстниц. Время реакции начинает изменяться в период беременности и в дальнейшем сохраняет более низкие значения, чем у нерожавших самок. Отмечено возрастание времени реакции на частоты 18 и 20 кГц, что может свидетельствовать о возрастном снижении верхнего порога частотного слуха. Подтверждена значимость звуков на частотах 125, 315, 630, 1000 Гц и 16 кГц для слуха серых тюленей.

Работа выполнена по теме «Териофауна арктических морей: физиология, экология и этология» (№ госрегистрации 124013000720-4) в рамках государственного задания ММБИ РАН.

Список литературы

1. 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 // Тр. Мурм. гос. техн. ун-та. 2023. Т. 26, № 2. С. 121–130. doi:10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130
2. Birth of a *Halichoerus grypus atlantica* (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS / A. A. Zaytsev, Y. V. Litvinov, M. V. Pakhomov, A. R. Troshichev, A. P. Yakovlev, P. A. Zavoloka // Aquatic Mammals. 2021. Vol. 47, iss. 1. P. 36–42. doi:10.1578/AM.47.1.2021.36
3. Burton R. W., Anderson S. S., Summers C. F. Perinatal activities in the grey seal (*Halichoerus grypus*) // J. Zool. 1975. Vol. 177. P. 197–201. doi:10.1111/j.1469-7998.1975.tb05978.x
4. Caras M. L. Estrogenic modulation of auditory processing: A vertebrate comparison // Front. Neuroendocrinol. 2013. Vol. 34, iss. 4. P. 285–299. doi:10.1016/j.yfrne.2013.07.006
5. Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of grey seal (*Halichoerus grypus*) pup calls // J. Mar. Biol. Ass. UK. 1998. Vol. 78, iss. 2. P. 651–658. doi:10.1017/S0025315400041680
6. Dudzinski K. M., Thomas J. A., Gregg J. D. Communication in marine mammals / W. Perrin, B. Würsig, J. Thewissen (Eds.) // Encyclopedia of marine mammals. Amsterdam: Academic Press, 2009. P. 260–269. doi:10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X

7. *Fogden S. C. L.* Mother-young behaviour at grey seal breeding beaches // *J. Zool.* 1971. Vol. 164, iss. 1. P. 61–92.
8. *Huang Q., Tang J.* Age-related hearing loss or presbycusis // *Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol.* 2010. Vol. 267. P. 1179–1191. doi:10.1007/s00405-010-1270-7
9. *Hydrodynamic* trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*) / G. Dehnhardt, B. Mauck, W. Hanke, H. Bleckmann // *Science* (New York, USA). 2001. Vol. 293. P. 102–104. doi:10.1126/science.1060514
10. *In-air* evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic seas / A. Ruser, M. Dähne, J. Sundermeyer, K. Lucke, D. S. Houser, J. J. Finneran, J. Driver, I. Pawliczka, T. Rosenberger, U. Siebert // *PLoS One*. 2014. Vol. 9, iss. 3. P. e90824. doi:10.1371/journal.pone.0090824
11. *McCulloch S., Boness D. J.* Mother-pup vocal recognition in the grey seal (*Halichoerus grypus*) of Sable Island, Nova Scotia, Canada // *J. Zool.* 2000. Vol. 251. P. 449–455. doi:10.1111/j.1469-7998.2000.tb00800.x
12. *Nowak L. J.* Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals // *Bioacoustics*. 2020. Vol. 30, iss. 6. P. 696–715. doi:10.1080/09524622.2020.1851298
13. *Percussive* underwater signaling in wild gray seals / D. P. Hocking, B. Burville, W. M. G. Parker, A. R. Evans, T. Park, F. G. Marx // *Mar. Mam. Sci.* 2020. Vol. 36, iss. 2. P. 728–732. doi:10.1111/mms.12666
14. *Schlittenlacher J., Ellermeier W.* Simple reaction time to the onset of time-varying sounds // *Att. Perc. Psychophys.* 2015. Vol. 77. P. 2424–2437. doi:10.3758/s13414-015-0940-3
15. *Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C.* Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *J. Exp. Biol.* 2014. Vol. 217, iss. 5. P. 726–760. doi:10.1242/jeb.097469
16. *Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C.* Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements // *J. Exp. Biol.* 2015. Vol. 218, iss. 4. P. 2250–2259. doi:10.1242/jeb.120972
17. *Stansbury A. L., Janik V. M.* The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups // *Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci.* 2021. Vol. 376, iss. 1836. P. 20200251. doi:10.1098/rstb.2020.0251
18. *The effect* of signal duration on the underwater hearing thresholds of two harbor seals (*Phoca vitulina*) for single tonal signals between 0.2 and 40 kHz / R. A. Kastelein, L. Hoek, P. J. Wensveen, J. M. Terhune, C. A. de Jong // *J. Acoust. Soc. Am.* 2010. Vol. 127, iss. 2. P. 1135–1145. doi:10.1121/1.3283019
19. *The status* of grey seals *Halichoerus grypus* in North Norway and on the Murman Coast, Russia / T. Haug, G. Henriksen, A. Kondakov, V. Mishin, K. T. Nilssen, N. Røv // *Biol. Cons.* 1994. Vol. 70, iss. 1. P. 59–67. doi:10.1016/0006-3207(94)90299-2

References

1. Pakhomov M. V., Zaytsev A. A., Litvinov Yu. V., Troshichev A. R. Primenenie metodov tonal'noy audiometrii dlya otsenki slukha serykh tyuleney v vozduшной i vodnoy srede [Application of tonal audiometry methods for assessing the hearing of gray seals in the air and aquatic environment]. *Trudy Murmanskogo gosydarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Transactions of the Murmansk State Technical University], 2023, Vol. 26, No. 2, pp. 121–130 (In Russ.). doi:10.21443/1560-9278-2023-26-2-121-130
2. Zaytsev A. A., Litvinov Y. V., Pakhomov M. V., Troshichev A. R., Yakovlev A. P., Zavoloka P. A. Birth of a *Halichoerus grypus atlantica* (Nehring, 1866) pup at the biotechnical aquacomplex of MMBI RAS. *Aquatic Mammals*, 2021, Vol. 47, Iss. 1, pp. 36–42. doi:10.1578/AM.47.1.2021.36
3. Burton R. W., Anderson S. S., Summers C. F. Perinatal activities in the grey seal (*Halichoerus grypus*). *J. Zool.*, 1975, Vol. 177, pp. 197–201. doi:10.1111/j.1469-7998.1975.tb05978.x
4. Caras M. L. Estrogenic modulation of auditory processing: A vertebrate comparison. *Front. Neuroendocrinol.*, 2013, Vol. 34, Iss. 4, pp. 285–299. doi:10.1016/j.yfrne.2013.07.006
5. Caudron A. K., Kondakov A. A., Siryanov S. V. Acoustic structure and individual variation of grey seal (*Halichoerus grypus*) pup calls. *J. Mar. Biol. Ass. UK*, 1998, Vol. 78, Iss. 2, pp. 651–658. doi:10.1017/S0025315400041680

6. Dudzinski K. M., Thomas J. A., Gregg J. D. Communication in marine mammals. W. Perrin, B. Würsig, J. Thewissen (Eds.). Encyclopedia of marine mammals, Amsterdam, Academic Press, 2009, pp. 260–269. doi:10.1016/B978-0-12-373553-9.00064-X
7. Fogden S. C. L. Mother-young behaviour at grey seal breeding beaches. J. Zool., 1971, Vol. 164, Iss. 1, pp. 61–92.
8. Huang Q., Tang J. Age-related hearing loss or presbycusis. Eur. Arch. Oto-Rhino-Laryngol., 2010, Vol. 267, pp. 1179–1191. doi:10.1007/s00405-010-1270-7
9. Dehnhardt G., Mauck B., Hanke W., Bleckmann H. Hydrodynamic trail-following in harbor seals (*Phoca vitulina*). Science (New York, NY), 2001, Vol. 293, pp. 102–104. doi:10.1126/science.1060514
10. Ruser A., Dähne M., Sundermeyer J., Lucke K., Houser D. S., Finneran J. J., Driver J., Pawliczka I., Rosenberger T., Siebert U. In-air evoked potential audiometry of grey seals (*Halichoerus grypus*) from the North and Baltic Seas. PLoS One, 2014, Vol. 9, Iss. 3, p. e90824. doi:10.1371/journal.pone.0090824
11. McCulloch S., Boness D. J. Mother–pup vocal recognition in the grey seal (*Halichoerus grypus*) of Sable Island, Nova Scotia, Canada. J. Zool., 2000, Vol. 251, pp. 449–455. doi:10.1111/j.1469-7998.2000.tb00800.x
12. Nowak L. J. Observations on mechanisms and phenomena underlying underwater and surface vocalisations of grey seals. Bioacoustics, 2020, Vol. 30, Iss. 6, pp. 696–715. doi:10.1080/09524622.2020.1851298
13. Hocking D. P., Burville B., Parker W. M. G., Evans A. R., Park T., Marx F. G. Percussive underwater signaling in wild gray seals. Mar. Mam. Sci., 2020, Vol. 36, Iss. 2, pp. 728–732. doi:10.1111/mms.12666
14. Schlittenlacher J., Ellermeier W. Simple reaction time to the onset of time-varying sounds. Att. Perc. Psychophys., 2015, Vol. 77, pp. 2424–2437. doi:10.3758/s13414-015-0940-3
15. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in spotted seals (*Phoca largha*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. J. Exp. Biol., 2014, Vol. 217, Iss. 5, pp. 726–760. doi:10.1242/jeb.097469
16. Sills J. M., Southall B. L., Reichmuth C. Amphibious hearing in ringed seals (*Pusa hispida*): underwater audiograms, aerial audiograms and critical ratio measurements. J. Exp. Biol., 2015, Vol. 218, Iss. 14, pp. 2250–2259. doi:10.1242/jeb.120972
17. Stansbury A. L., Janik V. M. The role of vocal learning in call acquisition of wild grey seal pups. Philos. Trans. R. Soc. B: Biol. Sci., 2021, Vol. 376, Iss. 1836, pp. 20200251. doi:10.1098/rstb.2020.0251
18. Kastelein R. A., Hoek L., Wensveen P. J., Terhune J. M., de Jong C. A. The effect of signal duration on the underwater hearing thresholds of two harbor seals (*Phoca vitulina*) for single tonal signals between 0.2 and 40 kHz. J. Acoust. Soc. Am., 2010, Vol. 127, Iss. 2, pp. 1135–1145. doi:10.1121/1.3283019
19. Haug T., Henriksen G., Kondakov A., Mishin V., Nilssen K. T., Røv N. The status of grey seals *Halichoerus grypus* in North Norway and on the Murman Coast, Russia. Biol. Cons., 1994, Vol. 70, Iss. 1, pp. 59–67. doi:10.1016/0006-3207(94)90299-2

Информация об авторах

Пахомов Мирон Владимирович – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

Зайцев Александр Алексеевич – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Яковлев Андрей Петрович – научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Трошичев Александр Родионович – младший научный сотрудник

Литвинов Юрий Владимирович – младший научный сотрудник

Information about the authors

Miron V. Pakhomov – Researcher, <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

Alexander A. Zaytsev – Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Andrey P. Yakovlev – Researcher, <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Alexander R. Troshichev – Junior Researcher

Yury V. Litvinov – Junior Researcher

Статья поступила в редакцию 24.03.2025; одобрена после рецензирования 21.04.2025; принята к публикации 22.05.2025.
The article was submitted 24.03.2025; approved after reviewing 21.04.2025; accepted for publication 22.05.2025