

УДК 57.045

## Исследование способности серых тюленей дифференцировать сложносоставные звуковые сигналы

Ю. В. Литвинов\*, М. В. Пахомов

\*Мурманский морской биологический институт, г. Мурманск, Россия;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4193-0656>, e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию  
07.03.2019;  
получена после  
доработки 26.04.2019

Ключевые слова:  
серый тюлень,  
акустический шум,  
звуковой стимул

Техногенное шумовое загрязнение морей и океанов оказывает значительное воздействие на физиологию и поведение морских млекопитающих. В ходе исследования данного воздействия были проанализированы способности серых тюленей запоминать и дифференцировать схожие по амплитудно-частотным характеристикам сложносоставные звуковые сигналы. Экспериментальная работа включала три этапа: 1) обучение тюленей нажимать на педаль только при подаче определенного звукового сигнала; 2) тренировки при добавлении второго звукового сигнала, по частотным характеристикам значительно отличающегося от подкрепляемого сигнала; 3) занятия при добавлении третьего звукового сигнала, по частотным характеристикам близкого к подкрепляемому. На каждом этапе проводилось по 12 опытов; количество предъявлений стимулов было не ограничено; опыт считался завершенным, когда тюлень осуществлял 20 правильных выборов. В качестве звуковых стимулов использовались звукозаписи работы дизельных двигателей на холостом ходу. Эксперимент проводился в условиях аквакомплекса Мурманского морского биологического института, расположенного в акватории Кольского залива (г. Полярный). Подопытными животными являлись четыре особи серого тюленя (*Halichoerus grypus* Fabricius, 1791) разных возрастов: две 12-летние самки, двухлетние самка и самец. В ходе эксперимента было показано, что воспроизведенный звук работы дизельного двигателя при уровне звукового давления 60–70 дБ является для серых тюленей воспринимаемым звуковым стимулом. При первой демонстрации звукового раздражителя отмечалось поведение тюленей, характерное для реакции избегания нового неизвестного стимула, в дальнейшем такая реакция у подопытных тюленей не фиксировалась, а также наблюдалось появление стойкого дифференцировочного условного рефлекса на заданный звуковой раздражитель (все исследуемые тюлени достоверно отличали его от схожих раздражителей). Полученные данные свидетельствуют о том, что время возникновения ответной реакции на предъявляемый внешний стимул зависит от индивидуальных особенностей серых тюленей.

Для цитирования

Литвинов Ю. В. и др. Исследование способности серых тюленей дифференцировать сложносоставные звуковые сигналы. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 2. С. 249–257.  
DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257.

## Investigation of the ability of gray seals to differentiate composite audio signals

Yu. V. Litvinov\*, M. V. Pakhomov

\*Murmansk Marine Biological Institute, Murmansk, Russia;  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4193-0656>, e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru)

Article info

Received 07.03.2019;  
received in revised  
26.04.2019

Key words:  
gray seal,  
acoustic noise,  
sound stimulus

Abstract

Technogenic noise pollution of the seas and oceans has a significant impact on the physiology and behavior of marine mammals. The ability of gray seals to memorize and differentiate complex acoustic signals with similar amplitude-frequency characteristics has been analyzed while studying this impact. The experiment consisted of three stages. At the first stage, the seals were trained to press the pedal only when a certain sound signal was given. At the second stage, the second sound signal was added, in frequency characteristics significantly different from the reinforced signal. At the third stage, the third sound signal was added close in frequency characteristics to the supported one. At each stage, 12 experiments were conducted, the number of stimulus presentations was not limited, the experiment was considered complete when the seal made 20 correct choices. The sound stimuli used were sound recordings of diesel engines at idle. The experiment was conducted in the MMBI aquacomplex located in the Kola Bay (the town of Polyarny). The experimental animals were 4 species of the gray seal (*Halichoerus grypus* Fabricius, 1791) of different ages: seals No. 1 and No. 2 – 12-year-old females, seal No. 3 – 2-year-old female, seal No. 4 – 2-year old male. During the experiment, it has been shown that the reproduced sound of a diesel engine at a sound pressure level of 60–70 dB is a perceived sound stimulus for gray seals. At the first demonstration of a sound stimulus in seals, behavior characteristic of the reaction to avoid a new unknown stimulus has been noted, and no further reaction has been observed in the experimental seals. Later on, the seals have managed to develop a stable differentiating conditioned reflex to a given sound stimulus, which all the investigated seals have reliably distinguished from similar stimuli. It has been found that the time of onset of the response to an external stimulus presented is of an individual character in gray seals.

For citation

Litvinov, Yu. V. et al. 2019. Investigation of the ability of gray seals to differentiate composite audio signals. *Vestnik of MSTU*, 22(2), pp. 249–257. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-249-257.

## Введение

Влияние акустического шума на физиологию и поведение морских млекопитающих достаточно подробно изучено в ряде исследований (*Richardson et al., 1995; Gordon et al., 2003; Tyack, 2009; Southall et al., 2007*). Значительное воздействие на ластоногих и китообразных оказывают интенсивные импульсы с уровнем звукового давления свыше 150 дБ, возникающие при сейсмографических работах (*Gordon et al., 2003*) и попадании животных в зоны работы мощных сонаров (*Nabi et al., 2018*). В литературе описаны случаи кратковременного и длительного оглушения касаток (*Orcinus orca* Linnaeus, 1758) (*Cominelli et al., 2018*), морских свиней (*Phocoena phocoena* Linnaeus, 1758) (*Wisniewska et al., 2018*), финвалов (*Balaenoptera physalus* Linnaeus, 1758) (*Castellote et al., 2012*) и обыкновенных тюленей (*Phoca vitulina* Linnaeus, 1758) (*Ydesen et al., 2014*), при этом случаев патологического и тем более летального воздействия акустических шумов на морских млекопитающих зарегистрировано не было (*Dunlop et al., 2017*).

При проведении экспериментальных работ, исследующих воздействие акустических шумов на организм морских млекопитающих, были отмечены изменения в поведении кольчатых нерп (*Phoca hispida* Schreber, 1775) (*Пахомов и др., 2010*), обыкновенных и гренландских тюленей (*Pagophilus groenlandicus* Erxleben, 1777) (*Kastak et al., 1999; Kastelein et al., 2006*). Стоит отметить, что в данных исследованиях в качестве раздражителя использовались белый шум, шумы в заданном диапазоне частот или чистые тона с фиксированными уровнями звукового давления (75–150 дБ), которые составляют только малую часть спектра естественных и антропогенных шумов в океане (*Turnbull et al., 1990; Hildebrand, 2009*). В то же время достоверно установлено, что слуховая система является доминирующей сенсорной системой у морских млекопитающих (*Богословская и др., 1979*), и отмечены случаи, когда полностью слепые дикие тюлени имели нормальную упитанность и ярко выраженные ориентировочные навыки, выработанные на суше только с помощью слуха (*Richardson et al., 1995*). В целом в научной литературе представлены данные об анатомии и физиологии слуховой системы морских млекопитающих, в частности настоящих тюленей, для которых указаны звуковые пороги восприятия, диапазон воспринимаемых частот, минимально воспринимаемые частотные и амплитудные интервалы (*Kastelein et al., 2006*). В вышеуказанных исследованиях для изучения параметров слуха тюленей использовались звуки чистых тонов; информация о способности настоящих тюленей запоминать и дифференцировать сложносоставные звуки в научной литературе не представлена. Однако на тот факт, что тюлени способны оперировать сложносоставными звуками, указывает способность тюленей обучаться выполнению звуковых команд в процессе дрессировки (*Мамушов и др., 2010*).

Целью настоящего исследования является изучение способности серых тюленей запоминать и дифференцировать схожие по амплитудно-частотным характеристикам сложносоставные звуковые сигналы.

## Материалы и методы

Исследование способности серых тюленей запоминать и дифференцировать схожие звуковые сигналы включало три этапа, на каждом из которых проводилось по 12 опытов; количество предъявлений стимулов было не ограничено; опыт считался завершенным, когда тюлень осуществлял 20 правильных выборов. На первом этапе тюлени обучались нажимать на педаль только при подаче звукового сигнала; на втором этапе был добавлен второй звуковой сигнал, по частотным характеристикам значительно отличающийся от подкрепляемого сигнала; на третьем – добавлен третий звуковой сигнал, по частотным характеристикам близкий к подкрепляемому.

В данном исследовании был использован классический метод "стимул – реакция" (*Торндайк, 1998; Nigam, 2006*) с одним подкрепляемым стимулом и тремя неподкрепляемыми стимулами той же модальности (включая "тишину"). При возникновении внешнего определенного звукового стимула реакция исследуемого животного заключалась в нажатии на педаль (с последующим подкреплением реакции в виде пищевого поощрения).

В качестве звуковых стимулов использовались звукозаписи работы дизельных двигателей на холостом ходу. Данный тип сложносоставных звуков был выбран потому, что они являются основной составляющей техногенного шумового фона в естественных местах обитания исследуемого вида тюленей. Серые тюлени предпочитают для лежки места, удаленные от объектов стационарной морской инфраструктуры, и основными источниками шума в данных областях являются суда морского и авиатранспорта, кратковременно пересекающие данные области (*Hildebrand, 2009; Tournadre, 2014; Merchant et al., 2014*).

Подкрепляемым стимулом в опытах был звук работы четырехтактного турбокомпрессорного 16-цилиндрового дизельного тепловозного двигателя (рис. 1).

В качестве первого неподкрепляемого звука применялся звук работы на холостом ходу четырехтактного турбокомпрессорного 8-цилиндрового дизельного двигателя КамАЗ-740 (рис. 2). В отличие от подкрепляемого звукового стимула, где преобладали низкие частоты (до 100 Гц), в данном звуке были ярко выражены пики на частотах, близких к 600 и 1200 Гц.

Второй неподкрепляемый стимул – звук работы на холостом ходу четырехтактного 6-цилиндрового судового дизельного двигателя (рис. 3). По спектральным характеристикам данный звук наиболее близок к подкрепляемому стимулу, в нем также преобладают низкие частоты и, по нашей субъективной оценке, он сходен с подкрепляемым звуковым стимулом, отличаясь лишь более выраженной "басовитостью".

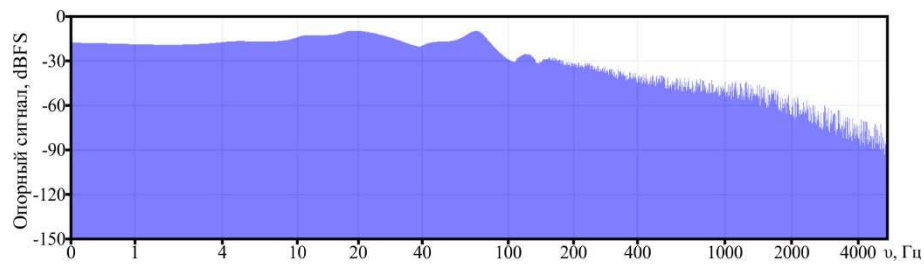


Рис. 1. Спектрограмма подкрепляемого звука  
Fig. 1. Spectrogram of the reinforced sound

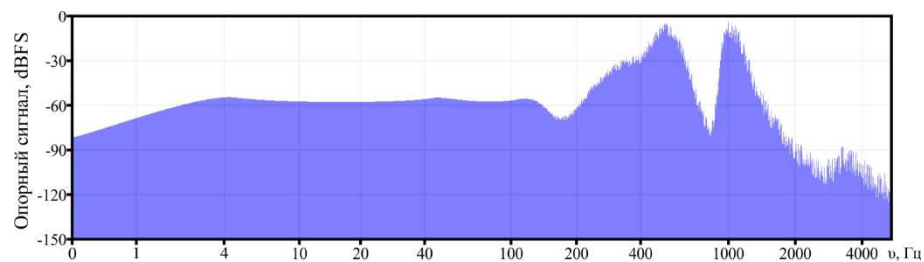


Рис. 2. Спектрограмма первого неподкрепляемого звука  
Fig. 2. Spectrogram of the first non-reinforced sound

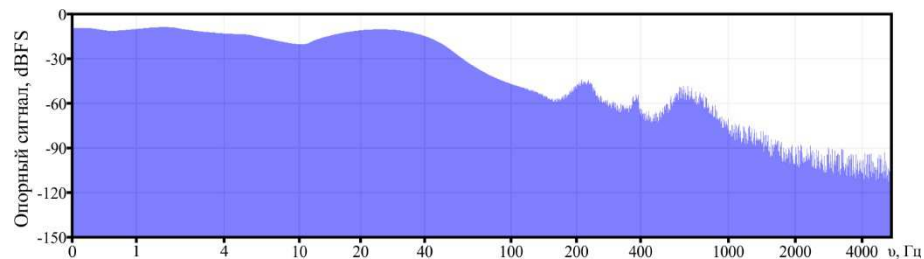


Рис. 3. Спектрограмма второго неподкрепляемого звука  
Fig. 3. Spectrogram of the second non-reinforced sound

Все звуки были обработаны и приведены к общему уровню громкости с помощью цифрового аудиоредактора MAGIX Sound Forge.

Эксперимент проводился в условиях аквакомплекса Мурманского морского биологического института, расположенного в акватории Кольского залива (г. Полярный). Подопытными животными были четыре особи серого тюленя (*Halichoerus grypus* Fabricius, 1791) разных возрастов: 12-летние самки 1 и 2, двухлетняя самка 3, двухлетний самец 4.

В качестве пищевого поощрения на всем протяжении эксперимента использовалось нарезанное кусочками по 20 г филе атлантической сельди. Для стимулирования пищевой мотивации исследуемых животных за неделю до начала эксперимента объем их корма был постепенно снижен на 25 % от нормального индивидуального рациона. Опыты с каждым тюленем выполнялись один раз в сутки (с 7:00 до 8:00), основную порцию пищи тюлени получали на утреннем кормлении (70 % дневного рациона), на вечернем кормлении, независимо от результатов утренних работ, тюленя докармливали оставшимися 30 % корма. Эксперименты осуществлялись при отсутствии сильного ветра (более 2 баллов) и волнения воды (более 2 баллов), а также активных работ на акватории и других источников шума. Уровень шума в районе вольеров не превышал 48 дБ, измерения проводились с помощью шумомера СЕМ DT-805.

В процессе исследований применялась экспериментальная установка (рис. 4), состоящая из смартфона Sony Xperia Z3 с операционной системой Android (1); портативной беспроводной акустической системы JBL Flip 4 (2); проводной гарнитуры Sony STN32 (3); микроконтроллера Arduino NANO 3.0 на чипе ATmega328P (4) с подключенными к нему модулем беспроводной связи HC-05 (5), пьезоэлектрическим зуммером (6) и педалью (7). Электронные компоненты были помещены в герметичный контейнер (8).

Исполняемое приложение для смартфона выполнено в среде разработки Android Studio, исполняемый код для микроконтроллера создавался и компилировался в среде разработки Arduino IDE.

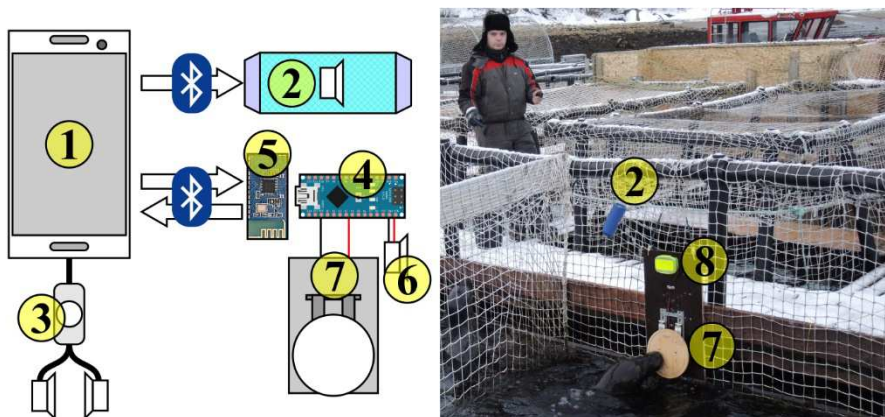


Рис. 4. Схема экспериментальной установки  
Fig. 4. Scheme of the experimental installation

Общая схема каждого опыта выглядела следующим образом. Оператор устанавливал в вольер педаль, проводил тестирование системы, затем отходил на позицию, запускал программу эксперимента на смартфоне и ожидал сигнала о подаче пищевого поощрения. При включении системы смартфон подсоединялся по протоколу Bluetooth 4.0 к колонке (только передача данных без обратного приема) и микроконтроллеру (режим приема/передачи). Перед тестированием проверялась связь с колонкой (подавался тестовый звук) и микроконтроллером (проверялись операции нажатия кнопки и подачи бридж-сигналов), затем на гарнитуре испытывалась работа динамиков (подача тестового звука) и кнопок. С началом эксперимента программа на первом этапе выдерживала 15–30 с тишины, затем начинала проигрывать подкрепляемый звук в течение 20 с. Уровень звукового давления, измеренный на расстоянии 1 м от акустической системы, составлял 60–70 дБ. На втором этапе, когда к подкрепляемому звуку добавили неподкрепляемый, программа также в начале опыта выдерживала 15–30 с тишины, затем проигрывала в течение 20 с либо подкрепляемый звук, либо неподкрепляемый, далее промежутки тишины между двумя сигналами уменьшались до 5 с. Очередность сигналов генерировалась по принципу: не более двух одинаковых сигналов подряд. На третьем этапе, когда был добавлен третий сигнал, генерация осуществлялась по двум принципам: сигналы проигрываются триплетами, в каждом триплете присутствует на случайном месте каждый сигнал. Первый сигнал триплета не должен повторять сигнал предыдущего триплета. Такие алгоритмы генерации использовались для того, чтобы избежать ситуации, когда один и тот же сигнал звучит слишком часто или постоянно. Если тюлень нажимал на педаль во время воспроизведения подкрепляемого звука, то программа подавала микроконтроллеру команду проиграть положительный бридж-сигнал, а оператору – сигнал о подаче пищевого поощрения. Оператор кидал кусок рыбы в вольер, убеждался, что рыба съедена, и нажимал на кнопку в гарнитуре, что запускало новый цикл опыта. Если тюлень нажимал на педаль в период тишины или при проигрывании неподкрепляемого звука, то следовали подача отрицательного бридж-сигнала и "штрафные" 5 с тишины. Данный "штраф" был введен для того, чтобы исключить ситуацию, когда тюлень постоянно бы нажимал на педаль через короткие промежутки времени, таким образом рано или поздно сделав 20 правильных выборов. Затем цикл опыта повторялся. Когда тюлень осуществлял 20 правильных выборов, опыт заканчивался, оператору подавался сигнал об окончании, установка демонтировалась, тюленя докармливали. Протоколы каждого опыта автоматически вносились смартфоном в текстовый файл, где указывались номер тюленя, дата и время опыта, данные о времени подачи сигнала и нажатия на педаль. Также велась видеофиксация каждого опыта. Для повышения объективности оценки получаемых результатов непосредственно с тюленями работал только оператор; данные передавались на обработку только по окончании эксперимента. Таким образом, экспериментатор не имел возможности делать промежуточные оценки и влиять на ход эксперимента. При обработке полученных данных оценивались доля верных выборов за каждый опыт и время реакции на подкрепляемый стимул.

### Результаты и обсуждение

На первом этапе эксперимента все тюлени демонстрировали схожую динамику обучения, при этом у всех животных после фактически линейного роста доли верных выборов на 6-м опыте наблюдалось ее снижение с последующим переходом на 90–100%-е результаты (рис. 5).

Время возникновения ответной реакции на подкрепляемый стимул у тюленей 1, 2 и 4 с каждым опытом снижалось и к 9-му опыту принимало относительно постоянные значения, индивидуальные для каждого тюленя. У тюленя 3 такой динамики не наблюдалось (рис. 6). При анализе видеопотоков

опытов было установлено, что тюлени 1, 2 и 4 к 2–4-му опытам начинали самостоятельно занимать позицию рядом с педалью и ожидать подачи сигнала, в то время как тюлень 3 продолжал свободно плавать по вольеру. Таким образом, в ходе эксперимента стало возможным установить среднее время реакции на звуковой стимул для тюленей 1 (2,83 с), 2 (3,32 с) и 4 (3,41 с). Время реакции тюленя 3 зависело от того, где в момент подачи звукового сигнала он находился.

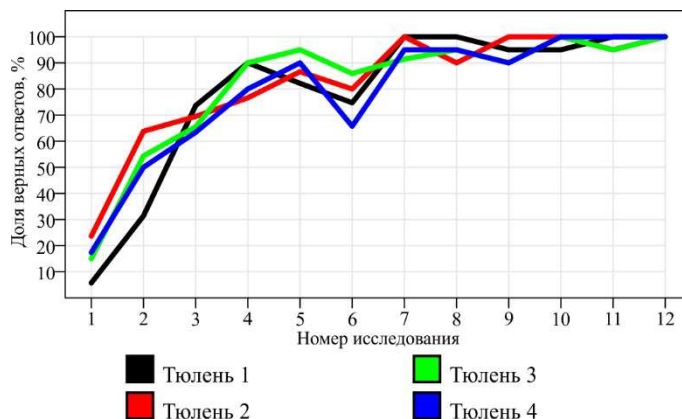


Рис. 5. Доля верных ответов при обучении  
 Fig. 5. Proportion of correct answers when learning

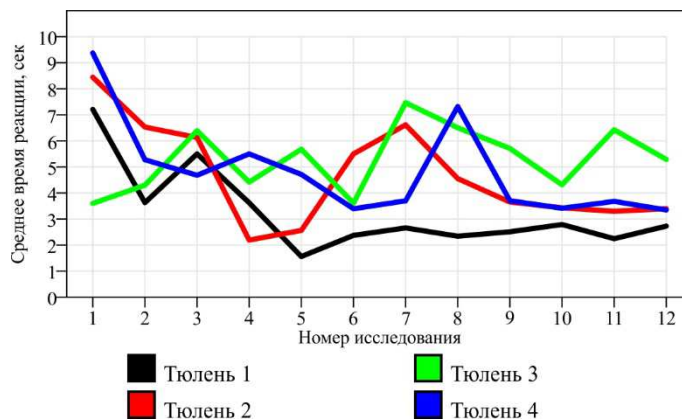


Рис. 6. Среднее время реакции при обучении  
 Fig. 6. Average reaction time when learning

При введении второго неподкрепляемого звукового стимула (рис. 7) доля верных выборов у всех животных в первом опыте значительно снизилась до уровня случайного угадывания, но в последующих опытах наблюдался линейный рост доли правильных результатов, достигая 90–100 % в течение 7–9-го опытов (после 140–200 предъявлений стимула).

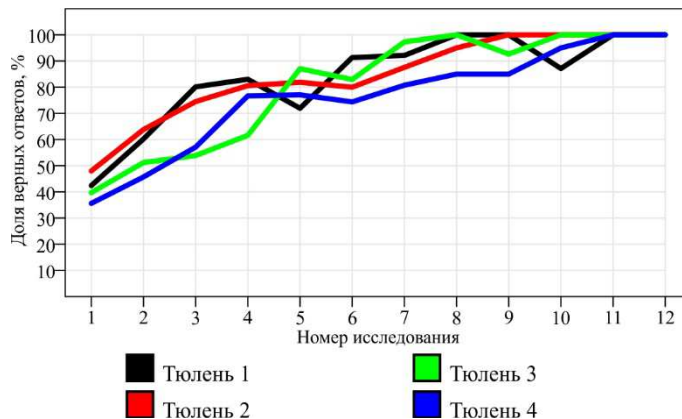


Рис. 7. Доля верных ответов при добавлении первого неподкрепляемого сигнала  
 Fig. 7. Proportion of correct answers while adding the first non-reinforced signal

Скорость возникновения ответной реакции 12-летних тюленей 1 и 2 в ходе первого опыта не отличалась от среднего времени, отмеченного на предыдущем этапе (при большой доле неверных предъявлений); нажатий на педаль при отсутствии звуковых сигналов не наблюдалось; начиная со второго опыта время реакции возрастало. Анализ видеопротоколов показал, что тюлени прислушивались и только потом делали выбор. Начиная с 5-го опыта скорость ответной реакции снижалась; в ходе последних опытов среднее время выполнения стало соответствовать среднему значению, полученному на предыдущем этапе. На первых тренировках наблюдалось снижение времени реакции двухлетнего тюленя 4, при этом доля верных выборов была самой низкой в группе. В дальнейшем динамика изменения среднего времени реакции тюленя 4, так же как и 12-летних тюленей, увеличивалась, достигнув пика на 4-м опыте, затем постепенно снижалась (вместе с ростом доли верных выборов), а в конце этапа приблизилась к значениям средних показателей. Время реакции тюленя 3 постепенно увеличивалось, при этом на последних опытах этапа, когда доля верных выборов данного животного достигла 100 %, отмечалось значительное возрастание среднего времени реакции за опыт (рис. 8). Данные видеопротоколов свидетельствуют о том, что с 8-го опыта тюлень 3 перестал свободно плавать по вольеру и начал занимать позицию у педали.

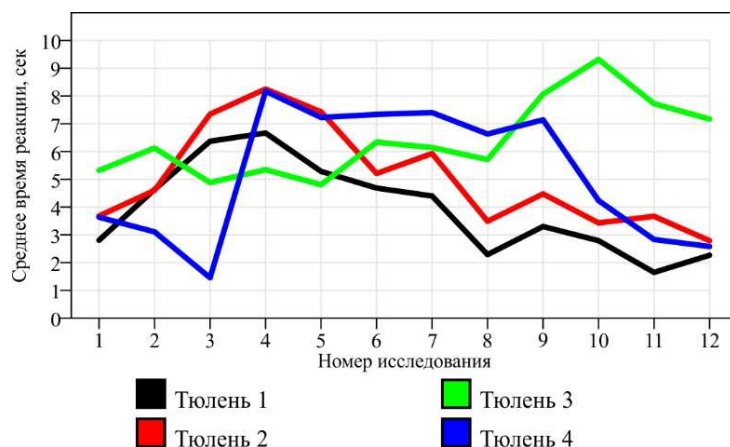


Рис. 8. Среднее время реакции при добавлении первого неподкрепляемого сигнала  
Fig. 8. Average response time while adding the first non-reinforced signal

На третьем этапе, когда был введен третий звуковой стимул, наиболее близкий по частотно-амплитудным характеристикам к подкрепляемому стимулу, наблюдались значительное снижение доли верных ответов тюленей 1–3 в ходе первого опыта и последующий плавный ее рост (рис. 9). У тюленя 3 изначально доля верных ответов была самой высокой в группе; в последующих опытах наблюдались более стремительный рост указанной доли и, аналогично первому этапу, ее спад в 6-м опыте (около 100 предъявлений стимула), а также резкий выход к 100 % в ходе следующего опыта с дальнейшим сохранением показателей.

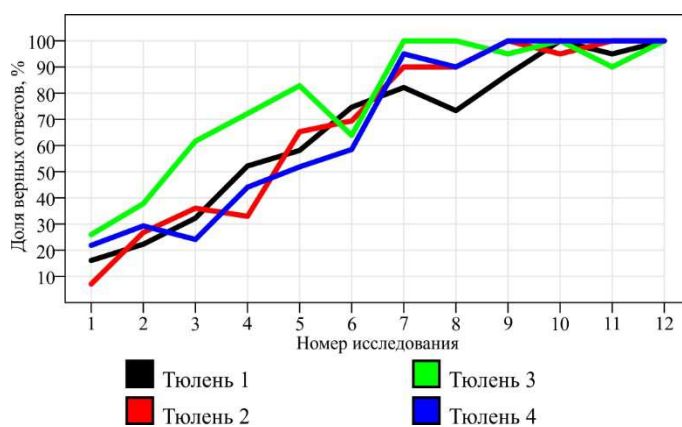


Рис. 9. Доля верных ответов при добавлении второго неподкрепляемого сигнала  
Fig. 9. Proportion of correct answers while adding the second non-reinforced signal

Динамика изменения времени реакции тюленей 1, 2 и 4 в целом соответствовала динамике предыдущего этапа. По завершению этапа среднее время реакции тюленей 1 и 2 увеличилось, а тюленя 4 – значительно

снизилось. Среднее время реакции тюленя 3 за период данного этапа изменялось незначительно и соответствовало средним показателям предыдущих этапов (рис. 10).

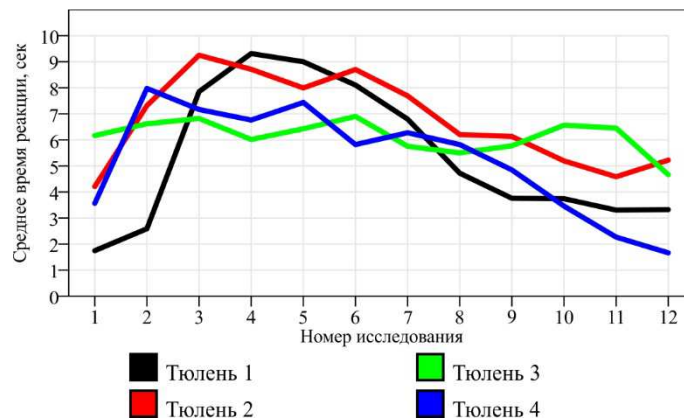


Рис. 10. Среднее время реакции при добавлении второго неподкрепляемого сигнала  
Fig. 10. Average reaction time while adding the second non-reinforced signal

### Заключение

В результате проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что звук работы двигателя внутреннего сгорания (техногенный шум) на уровне 60–70 дБ является для серых тюленей воспринимаемым звуковым стимулом и не вызывает заметных физиологических нарушений. При первой демонстрации звукового раздражителя отмечалось изменение поведения тюленей, характерное для реакции избегания нового неизвестного стимула; в дальнейшем такой реакции у подопытных тюленей не фиксировалось. Следует отметить, что время отклика на появление внешнего стимула зависит от индивидуальных и, по-видимому, возрастных особенностей серых тюленей, так как среднее время реакции двухлетних животных было ниже, чем 12-летних.

Экспериментальные работы показали возможность и преимущества применения современных средств обработки информации и автоматического управления при исследовании сенсорных способностей ластоногих. Ранее при изучении цветового зрения (Ишкулов и др., 2013; Войнов и др., 2013) и обоняния (Войнов и др., 2013; Литвинов и др., 2018) тюленей, содержащихся в аквакомплексе ММБИ, применялся метод "выбор из двух" (Nigam, 2006): по команде тренера тюлень должен был выбрать ранее подкрепляемый предмет из двух демонстрируемых. Данная методика не позволяла оценить время реакции животного на предъявляемый стимул, а также не исключала влияние экспериментатора на поведение исследуемого тюленя. При применении методики "стимул – реакция", когда тюленю в один момент времени демонстрировался только один стимул (или его отсутствие), и современных устройств обработки информации, более точно фиксирующих время реакции тюленя на действие стимула и исключающих влияние человеческого фактора на ход эксперимента, стало возможным оценить динамику формирования условного рефлекса на звуковой раздражитель, а также дифференцировочного условного рефлекса (при применении одномодалных стимулов).

### Библиографический список

1. Богословская Л. С., Солнцева Г. Н. Слуховая система млекопитающих: сравнительно-морфологический очерк. М.: Наука, 1979. 240 с.
2. Войнов В. Б., Зайцев А. А., Литвинов Ю. В., Михайлюк А. Л. [и др.]. Сенсорные возможности арктических тюленей в морских биотехнических системах // Вестник Южного научного центра РАН. 2013. Т. 9, № 4. С. 87–95.
3. Ишкулов Д. Г., Михайлюк А. Л., Пахомов М. В. Особенности цветовосприятия у серых тюленей // Вестник Кольского научного центра РАН. 2013. № 4(15). С. 84–90.
4. Литвинов Ю. В., Пахомов М. В. Исследование обоняния серых и гренландских тюленей с помощью метода оперантного обучения // Вестник МГТУ. 2018. Т. 21, № 2. С. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-2-336-343>.
5. Матишов Г. Г., Войнов В. Б., Вербицкий Е. В., Михайлюк А. Л. [и др.]. Морские млекопитающие в биотехнических системах двойного назначения. Мурманск: ММБИ КНЦ РАН, 2010. 131 с.
6. Пахомов М. В., Михайлюк А. Л. К вопросу о воздействии акустических шумов на физиологическое состояние кольчатой нерпы (*Pusa hispida*) // Морские млекопитающие Голарктики: сб. науч. тр. по материалам шестой междунар. конф., Калининград, 11–15 октября 2010 г. Калининград: Капрос, 2010. С. 470–471.
7. Торндайк Э. Принципы обучения, основанные на психологии // Психология как наука о поведении / Дж. Б. Уотсон. М.; Назрань: АСТ, 1998. 701 с.

8. Castellote M., Clark C. W., Lammers M. O. Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise // *Biological Conservation*. 2012. Vol. 147, Iss. 1. P. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021>.
9. Cominelli S., Devillers R., Yurk H., MacGillivray A. [et al.]. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population // *Marine Pollution Bulletin*. 2018. Vol. 136. P. 177–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.050>.
10. Dunlop R. A., Noad M. J., McCauley R. D., Scott-Hayward L. [et al.]. Determining the behavioural dose-response relationship of marine mammals to air gun noise and source proximity // *Journal of Experimental Biology*. 2017. Vol. 220, Iss. 16. P. 2878–2886. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.160192>.
11. Gordon J., Gillespie D., Potter J., Frantzis A. [et al.]. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals // *Marine Technology Society Journal*. 2003. Vol. 37, Nr. 4. P. 16–34.
12. Hildebrand J. A. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean // *Marine Ecology Progress Series*. 2009. Vol. 395. P. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps08353>.
13. Kastak D., Schusterman R. J., Southall B. L. [et al.]. Underwater temporary threshold shift induced by octave-band noise in three species of pinnipeds // *Journal of the Acoustical Society of America*. 1999. Vol. 106, Iss. 2. P. 1142–1148. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.427122>.
14. Kastelein R. A., van der Heul S., Terhune J. M. [et al.]. Detering effects of 8–45 kHz tone pulses on harbour seals (*Phoca vitulina*) in a large pool // *Marine Environmental Research*. 2006. Vol. 62, Iss. 5. P. 356–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2006.05.004>.
15. Merchant N. D., Pirotta E., Barton T. R. Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals // *Marine Pollution Bulletin*. 2014. Vol. 78, Iss. 1-2. P. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.058>.
16. Nabi G., McLaughlin R. W., Hao Y., Wang K. [et al.]. The possible effects of anthropogenic acoustic pollution on marine mammals' reproduction: An emerging threat to animal extinction // *Environmental Science and Pollution Research*. 2018. Vol. 25, Iss. 20. P. 19338–19345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2208-7>.
17. Nigam S. C. *Experimental animal physiology and biochemistry*. New Age International, 2006.
18. Richardson W. J., Greene C. R., Jr., Malme C. I., Thomson D. H. [et al.]. *Marine mammals and noise*. San Diego : Academic Press, 1995. 577 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02253-3>.
19. Southall B. L., Bowles A. E., Ellison W. T., Finneran J. J. [et al.]. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations // *Aquatic Mammals*. 2007. Vol. 33, Nr. 4. P. 411–521.
20. Tournadre J. Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis // *Geophysical Research Letters*. 2014. Vol. 41, Iss. 22. P. 7924–7932. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GL061786>.
21. Turnbull S. D., Terhune J. M. White noise and pure tone masking of pure tone thresholds of a harbour seal listening in air and underwater // *Canadian Journal of Zoology*. 1990. Vol. 68, Iss. 10. P. 2090–2097. DOI: <https://doi.org/10.1139/z90-291>.
22. Tyack P. L. Human-generated sound and marine mammals // *Physics Today*. 2009. Vol. 62, Iss. 11. P. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3265235>.
23. Wisniewska D. M., Johnson M., Teilmann J., Siebert U. [et al.]. High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*) // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2018. Vol. 285, Iss. 1872 : 20172314. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2314>.
24. Ydesen K. S., Wisniewska D. M., Hansen J. D., Beedholm K. [et al.]. What a jerk: Prey engulfment revealed by high-rate, super-cranial accelerometry on a harbour seal (*Phoca vitulina*) // *Journal of Experimental Biology*. 2014. Vol. 217, Iss. 13. P. 2239–2243. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.100016>.

## References

1. Bogoslovskaya, L. S., Solntseva, G. N. 1979. The mammalian auditory system (comparative morphological essay). Moscow, Nauka. (In Russ.)
2. Voynov, V. B., Zaitsev, A. A., Litvinov, Yu. V., Mikhailiuk, A. L. et al. 2013. Sensory abilities of arctic seals in marine biotechnical systems. *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN*, 9(4), pp. 87–95. (In Russ.)
3. Ishkulov, D. G., Mikhailiuk, A. L., Pakhomov, M. V. 2013. Features of color perception in gray seals. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN*, 4(15), pp. 84–90. (In Russ.)
4. Litvinov, Yu. V., Pakhomov, M. V. 2018. Investigation of the smell of gray and harp seals using operant learning method. *Vestnik of MSTU*, 21(2), pp. 336–343. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2018-21-2-336-343>. (In Russ.)
5. Matishov, G. G., Voynov, V. B., Verbithciy, E. V., Mikhailiuk, A. L. et al. 2010. Marine mammals in double used biotechnical systems. Murmansk, Izd-vo MMBI KNTs RAN. (In Russ.)
6. Pakhomov, M. V., Mikhailiuk, A. L. 2010. On the effect of acoustic noise on the physiological state of the ringed seal (*Pusa hispida*). In coll. articles *Marine mammals of the Holarctic*. Kaliningrad, Kapros, pp. 470–471. (In Russ.)



7. Thorndike, E., Watson, J. 1998. Principles of learning based on psychology. Psychology as a science of behavior. Moscow, Nazran, AST. (In Russ.)
8. Castellote, M., Clark, C. W., Lammers, M. O. 2012. Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation*, 147(1), pp. 115–122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2011.12.021>.
9. Cominelli, S., Devillers, R., Yurk, H., MacGillivray, A. et al. 2018. Noise exposure from commercial shipping for the southern resident killer whale population. *Marine Pollution Bulletin*, 136, pp. 177–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.08.050>.
10. Dunlop, R. A., Noad, M. J., McCauley, R. D., Scott-Hayward, L. et al. 2017. Determining the behavioural dose-response relationship of marine mammals to air gun noise and source proximity. *Journal of Experimental Biology*, 220(16), pp. 2878–2886. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.160192>.
11. Gordon, J., Gillespie, D., Potter, J., Frantzis, A. et al. 2003. A review of the effects of seismic surveys on marine mammals. *Marine Technology Society Journal*, 37(4), pp. 16–34.
12. Hildebrand, J. A. 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, 395, pp. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.3354/meps08353>.
13. Kastak, D., Schusterman, R. J., Southall, B. L. et al. 1999. Underwater temporary threshold shift induced by octave-band noise in three species of pinnipeds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 106(2), pp. 1142–1148. DOI: <https://doi.org/10.1121/1.427122>.
14. Kastelein, R. A., van der Heul, S., Terhune, J. M. et al. 2006. Deterring effects of 8–45 kHz tone pulses on harbour seals (*Phoca vitulina*) in a large pool. *Marine Environmental Research*, 62(5), pp. 356–373. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2006.05.004>.
15. Merchant, N. D., Pirota, E., Barton, T. R. 2014. Monitoring ship noise to assess the impact of coastal developments on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*, 78(1–2), pp. 85–95. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.10.058>.
16. Nabi, G., McLaughlin, R. W., Hao, Y., Wang, K. et al. 2018. The possible effects of anthropogenic acoustic pollution on marine mammals' reproduction: An emerging threat to animal extinction. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(20), pp. 19338–19345. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2208-7>.
17. Nigam, S. C. 2006. Experimental animal physiology and biochemistry. New Age International.
18. Richardson, W. J., Greene, C. R., Jr., Malme, C. I., Thomson, D. H. et al. 1995. Marine mammals and noise. San Diego, Academic Press. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2009-0-02253-3>.
19. Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J. et al. 2007. Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic Mammals*, 33(4), pp. 411–521.
20. Tournadre, J. 2014. Anthropogenic pressure on the open ocean: The growth of ship traffic revealed by altimeter data analysis. *Geophysical Research Letters*, 41(22), pp. 7924–7932. DOI: <https://doi.org/10.1002/2014GL061786>.
21. Turnbull, S. D., Terhune, J. M. 1990. White noise and pure tone masking of pure tone thresholds of a harbour seal listening in air and underwater. *Canadian Journal of Zoology*, 68(10), pp. 2090–2097. DOI: <https://doi.org/10.1139/z90-291>.
22. Tyack, P. L. 2009. Human-generated sound and marine mammals. *Physics Today*, 62(11), pp. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3265235>.
23. Wisniewska, D. M., Johnson, M., Teilmann, J., Siebert, U. et al. 2018. High rates of vessel noise disrupt foraging in wild harbour porpoises (*Phocoena phocoena*). *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 285(1872), 20172314. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.2314>.
24. Ydesen, K. S., Wisniewska, D. M., Hansen, J. D., Beedholm, K. et al. 2014. What a jerk: Prey engulfment revealed by high-rate, super-cranial accelerometry on a harbour seal (*Phoca vitulina*). *Journal of Experimental Biology*, 217(13), pp. 2239–2243. DOI: <https://doi.org/10.1242/jeb.100016>.

#### Сведения об авторах

**Литвинов Юрий Владимирович** – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [mmbi@mmbi.info](mailto:mmbi@mmbi.info), [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4193-0656>

**Yury V. Litvinov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183032; Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [litvinov-y@mail.ru](mailto:litvinov-y@mail.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4193-0656>

**Пахомов Мирон Владимирович** – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник; e-mail: [mmbi@mmbi.info](mailto:mmbi@mmbi.info), [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>

**Miron V. Pakhomov** – 17 Vladimirskaya Str., Murmansk, Russia, 183032; Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: [edr750v@yandex.ru](mailto:edr750v@yandex.ru), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1990-4822>