

УДК 57.045  
DOI: 10.7868/S25000640230311

## К ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДОКАЗАТЕЛЬСТВАМ МАГНИТОРЕЦЕПЦИИ У СЕРЫХ ТЮЛЕНЕЙ *HALICHOERUS GRYPUS ATLANTICA* NEHRING, 1886

© 2023 г. А.П. Яковлев<sup>1</sup>, А.А. Зайцев<sup>1</sup>

**Аннотация.** Совокупность современных данных магнитобиологии позволяет говорить о том, что биологическое действие весьма слабых магнитных полей как искусственного происхождения, так и связанных с солнечной и геомагнитной активностью, является реальностью. Магниторецепция, то есть восприятие магнитных полей, как предполагается, играет важную роль для ориентации и навигации у некоторых наземных и водных животных. Многие морские млекопитающие, как китообразные, так и ластоногие, совершают длительные миграции на большие расстояния. И если использование магниторецепции китообразными широко обсуждается в научном сообществе, то исследования, посвященные восприятию магнитных полей ластоногими, практически отсутствуют. Для изучения магниточувствительности у ластоногих мы сконструировали экспериментальный стенд на основе системы колец Гельмгольца. Объект исследования – три половозрелые самки серого тюленя *Halichoerus grypus atlantica*. С помощью метода инструментальных условных рефлексов и методики выбора объекта по заданным характеристикам мы обучили тюленей выбирать из двух или трех идентичных катушек Гельмгольца ту, в которой на данный момент генерировалось магнитное поле. В результате проведенных экспериментальных исследований нами было установлено, что искусственное магнитное поле частотой 8, 20 и 36 Гц с индукцией 110–130 мкТл является для серых тюленей воспринимаемым стимулом, на предъявление которого был выработан условный рефлекс. Средняя доля верных ответов превышала 79 % во всех контрольных испытаниях. Полученные данные позволяют утверждать, что серые тюлени обладают магниторецепцией.

**Ключевые слова:** серый тюлень, магниторецепция, условный рефлекс, морские млекопитающие.

## EXPERIMENTAL EVIDENCE OF MAGNETORECEPTION IN GREY SEALS *HALICHOERUS GRYPUS ATLANTICA* NEHRING, 1886

A.P. Yakovlev<sup>1</sup>, A.A. Zaytsev<sup>1</sup>

**Abstract.** Up-to-date magnetobiology data provide enough evidence that weak magnetic fields, whether of artificial nature or connected with the solar and geomagnetic activity, have a certain biological influence. Magnetoreception – a sense of magnetic fields – is considered to play an important role in the orientation and navigation of some land and marine animals. Many marine mammals, both cetaceans and pinnipeds, migrate over long distances. And when magnetoreception in cetaceans is widely discussed among scientists, there aren't many works about the sense of magnetic field in pinnipeds. We built an experimental stand based on the Helmholtz coils system to study the magnetosensitivity of pinnipeds. We took three mature female grey seals *Halichoerus grypus atlantica* as study objects. Seals were trained to choose from two or three identical Helmholtz coils the one which was generating the magnetic field at the moment of observations using the "instrumental conditioned reflex" method and method of selecting an object according to given characteristics. In the course of the experiment, we have found that generated magnetic field of 8, 20 and 36 Hz frequency

<sup>1</sup> Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: mmbi@mmbi.info

and 110–130  $\mu\text{T}$  induction is a detectable stimulus for grey seals at the presentation of which they were able to develop a conditioned reflex. The average rate of correct choices was over 79% during all check tests. Based on the acquired data we can state that grey seals have the ability of magnetoreception.

**Keywords:** gray seal, magnetoreception, conditioned reflex, marine mammals.

## ВВЕДЕНИЕ

Современная магнитобиология исследует механизмы и структуры, с помощью которых организмы могут обнаруживать естественные магнитные поля и использовать их для биологически важных целей [1]. С эволюционной точки зрения существование геомагнитного чувства неудивительно. То, что естественный отбор мог привести к появлению биологических структур, идеально приспособленных к тому, чтобы быть чувствительными к сравнительно слабому геомагнитному полю, видно на примере магнитотактических бактерий – полифилетической группы подвижных микроорганизмов, плавающих вдоль силовых линий магнитного поля [2].

Гипотеза о том, что живые организмы обладают магниторецепцией и используют магнитное поле Земли в качестве ориентира во время миграций, была косвенно подтверждена множеством поведенческих экспериментов, которые продемонстрировали способность различных животных извлекать информацию о местоположении в пространстве из окружающего магнитного поля [3].

Несмотря на изменения и региональные вариации, магнитное поле Земли обеспечивает постоянный источник информации о направлении и широте в глобальном масштабе благодаря своему дипольному характеру, который оно имело на протяжении последних 2 млрд лет. Животные в процессе эволюции приспособились к определенному уровню частотных и индукционных характеристик геомагнитного поля, поэтому геомагнитные возмущения и искусственные электромагнитные поля (ЭМП) могут вызывать у живых организмов неспецифические реакции по типу общего адаптационного синдрома, возникающего под действием любых внешних факторов стресса. Возможно развитие и специфических реакций [4].

В водной среде магниторецепция помогает животным ориентироваться в пространстве и совершать миграции на большие расстояния [5]. Исследования показали, что морские черепахи, рыбы и ракообразные обладают способностью воспринимать магнитные карты [6]. Предполагают, что кито-

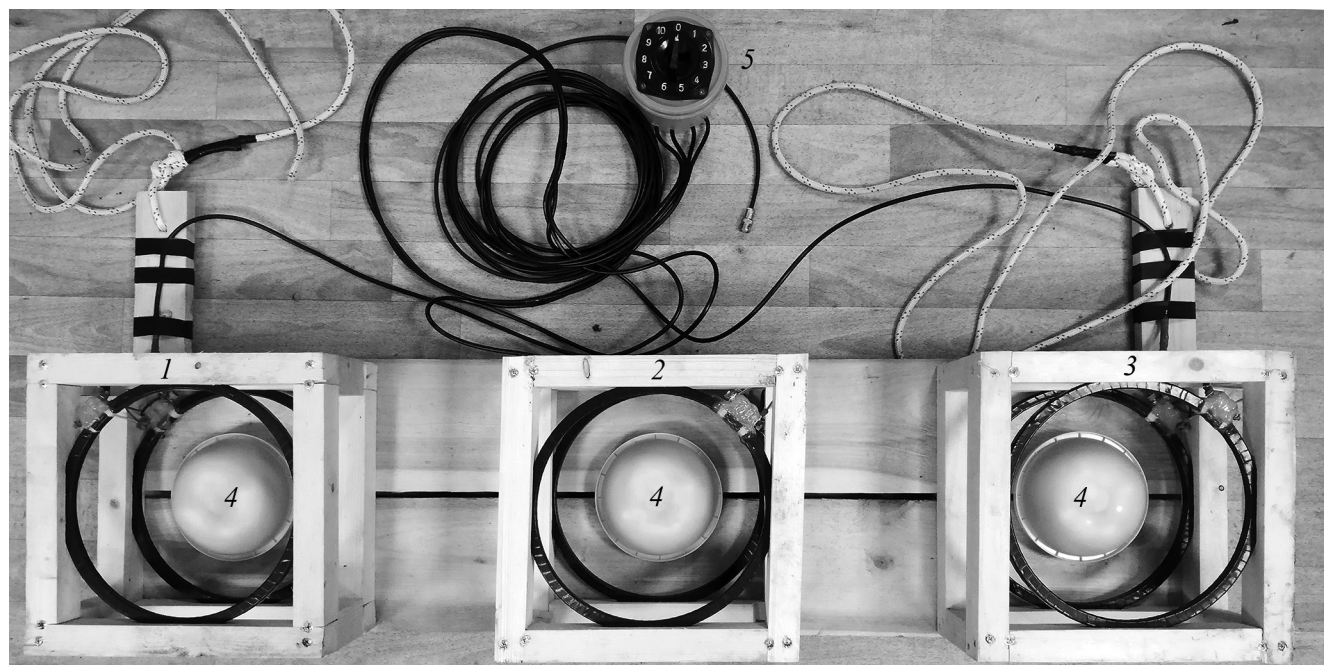
образные во время своих миграций ориентируются с помощью геомагнитного поля Земли [7]. В неволе дельфины-афалины *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) приближались к магнитному объекту быстрее, чем к идентичному немагнитному объекту, что указывает на магнитное чутье [8]. Другие исследования свидетельствуют о высокой чувствительности этих дельфинов к слабым магнитным полям природного и искусственного происхождения и о негативном эффекте такого влияния на работоспособность и, возможно, на ориентацию животного.

Многие морские млекопитающие, как китообразные, так и ластоногие, совершают длительные миграции на большие расстояния. И если использование магниторецепции китообразными широко обсуждается в научном сообществе [9; 10], то исследования, посвященные восприятию магнитных полей ластоногими, практически отсутствуют. Настоящие тюлени, совершая миграции в открытом море, по сути лишены визуальных ориентиров. Значительные глубины не позволяют использовать рельеф дна для ориентации, поскольку тюлени лишены эхолокации в отличие от китообразных. Звездное небо в качестве ориентира в условиях Крайнего Севера доступно редко, а солнце недоступно в полярную ночь. Логично предположить, что ластоногие могут использовать геомагнитное поле при совершении длительных миграций, а значит, могут обладать магниторецепцией.

Цель данной работы – показать наличие магниторецепторных способностей у серых тюленей.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Сконструировать и апробировать экспериментальный стенд для изучения магниторецепторных способностей у серых тюленей.
2. Адаптировать существующие методики проведения экспериментальных исследований под объект исследования.
3. Выработать условный рефлекс в ответ на предъявление переменного магнитного поля у серых тюленей.



**Рис. 1.** Экспериментальный стенд (вариант 2): 1, 2, 3 – катушки Гельмгольца, 4 – таргет, 5 – переключатель каналов подачи сигнала.

**Fig. 1.** Experimental stand (variant 2): 1, 2, 3 – Helmholtz coils, 4 – target, 5 – signal channel switch.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Эксперимент был осуществлен в период с июня по август 2020 г.

Объект исследования – три половозрелые самки *Halichoerus grypus atlantica* Nehring, 1886 в возрасте 15 лет. Животные содержатся в аквакомплексе Мурманского морского биологического института Российской академии наук, расположенном в открытой акватории Кольского залива, в условиях неволи, приближенных к естественной среде их обитания, с полуторамесячного возраста. Все тюлени выполняют широкий спектр команд, неоднократно участвовали в экспериментах различной направленности, имеют стойкую установку на обучение.

В магнитобиологии для получения однородного магнитного поля внутри определенного пространства широкую популярность получила система колец Гельмгольца (катушек Гельмгольца). По этой причине для исследования магниточувствительности у серых тюленей мы создали экспериментальный стенд на их основе.

Для генерации магнитного поля использовали 16-битный генератор сигналов произвольной формы АКПП-3418/1, с помощью которого можно создавать сигналы высокой точности. К генератору при помощи коаксиального кабеля через переключатель

подключаются катушки Гельмгольца, закрепленные на экспериментальном стенде (рис. 1).

Каждая катушка Гельмгольца представляет собой два кольца диаметром 25 см, на внешней стороне которых имеется паз для намотки медной проволоки, поверх которого размещается защитный кожух. Кольца и защитный кожух изготовлены из полиэтилена. Каждое из двух колец имеет 300 витков медной изолированной проволоки диаметром 0,2 мм, таким образом, на каждом кольце намотано 235,6 м проволоки. После установки защитного кожуха кольцо изолировалось при помощи изолянты и силикона для исключения попадания внутрь конструкции морской воды. Клеммы для подключения внутреннего и внешнего контактов проволоки выведены на специальные выступы в защитном кожухе.

Катушки Гельмгольца были закреплены при помощи деревянного каркаса на экспериментальном стенде. Расстояние между кольцами равнялось радиусу колец, то есть в нашей конструкции 12,5 см. Кольца были подключены последовательно. Каждая катушка была подключена коаксиальным кабелем к переключателю каналов, который имеет 10 независимых выходов и положение «ноль», при котором сигнал не подается ни на один из выходов. Переключатель каналов, в свою очередь, соединял-

ся с генератором сигналов с помощью коаксиального кабеля.

Теоретическая величина магнитной индукции, которую способны создавать изготовленные нами катушки Гельмгольца, составила 140 мкТл. Фактические значения индукции были измерены магнитометром (ВЕ-метр модели «АТ-004») и составляли 110–130 мкТл в зависимости от частоты генерируемого сигнала.

При работе катушек было произведено измерение издаваемого ими звука в инфразвуковом, ультразвуковом и слышимом человеком диапазонах, чтобы исключить возможность влияния этого фактора на выбор тюленя. Измерения проводили анализатором шума и вибрации «Ассистент». Замеры показали, что при генерации магнитного поля изготовленные нами кольца Гельмгольца не издают звуковых колебаний в вышеуказанных диапазонах. Показания прибора не отличались от фоновых значений при работе катушек на всех исследуемых частотах и составляли 45–50 дБ.

Во время прохождения переменного электрического тока через систему колец Гельмгольца кроме генерации магнитного поля неизбежно происходит выделение тепловой энергии. Теоретический расчет для нашего экспериментального стенда показывает, что в нем выделяется мощность 0,5–1 Вт. Исходя из того, что пары колец включаются в псевдослучайном порядке с условием не более трех повторений подряд, происходит практически равномерное выделение тепла в каждой из катушек. Кроме того, распределение тепла происходит в относительно большом объеме, и при контакте с холодной морской водой тепло достаточно быстро рассеивается. Следовательно, данным фактором в рамках наших экспериментов можно пренебречь.

При изучении магниточувствительности животных приходится сталкиваться с двумя главными проблемами. Первая из них связана с тем, что многие поведенческие результаты непротиворечивы с методологической точки зрения, не всегда воспроизводимы и неинформативны в отношении функционирования «магнитного чувства». Вторая трудность заключается в том, что пока неизвестно, где именно и каким образом детектируется магнитное поле. Поэтому трудно спланировать и осуществить «решающие» опыты, чтобы получить нужные поведенческие, анатомические и нейрофизиологические доказательства наличия этого чувства у животных и проанализировать его возможности.

Опыты с условными рефлексивными могли бы обеспечить нужную воспроизводимость и убедительность результатов, если требуется доказать факт магниточувствительности [11].

Первое, что следует проверить в экспериментах с выработкой условных рефлексов, – это могут ли животные различать магнитные стимулы. Поэтому прежде всего должны быть выбраны процедуры, позволяющие выяснить этот вопрос. Необходимо подобрать экспериментальную ситуацию, процедуру испытаний, способ оценки реакций, характер реакций и стимулов, подлежащих различению. Когда будет установлено, что животное различает интересующие нас стимулы, дальнейшие детали исследования будут определяться проверяемой гипотезой [12].

В экспериментах с условным рефлексом будет выявляться научение, то есть относительно устойчивое изменение поведения, обусловленное индивидуальным опытом. В частности, в экспериментах с дискриминативным научением видоизменяется какая-то доступная для измерения особенность поведения, приобретаемая в ходе обучения. При унитарной процедуре определяют ответ (да, нет), который при разных условиях стимуляции получает положительное или отрицательное подкрепление.

Магнитные поля – это стимулы, проникающие повсеместно, поэтому в экспериментальных ситуациях их можно предъявлять только последовательно по одному. Эксперименты с дифференцировкой, в которых стимулами служат магнитные поля, принадлежат к числу наиболее трудных для подопытных животных. Поэтому при изучении восприятия магнитных полей предпочтительна унитарная схема, а не опыты со сложными дифференцировками.

Разработанная нами процедура проведения экспериментов основывается на унитарном подходе. На первом этапе исследований три экспериментальных серых тюленя обучались идентифицировать новый для них стимул – искусственное низкочастотное переменное магнитное поле синусоидальной формы различной частоты. В сконструированной нами экспериментальной установке магнитная индукция создаваемого переменного магнитного поля внутри катушек Гельмгольца составляла от 110 до 130 мкТл, что практически в 2,5 раза превышает индукцию естественного геомагнитного поля для северных полярных широт [13].

В качестве методической основы проведения экспериментов был взят метод инструменталь-



**Рис. 2.** Экспериментальный стенд: *а* – вариант с двумя парами катушек; *б* – вариант с тремя парами катушек.  
**Fig. 2.** Experimental stands: *a* – variant with two pairs of coils; *b* – variant with three pairs of coils.

ных условных рефлексов [14; 15]. Этот метод был адаптирован с методикой выбора объекта по заданному признаку под объект исследования и поставленные цели экспериментов. Проведение опытов осуществлялось с применением двойного слепого метода.

Для двух серий экспериментов изготовлено два варианта экспериментального стенда: вариант 1 – стенд с двумя парами катушек Гельмгольца (рис. 2*а*); вариант 2 – с тремя парами катушек Гельмгольца (рис. 2*б*).

В первой серии экспериментов («выбор 1 из 2») тюлени были обучены дифференцировать объект по наличию магнитного поля, выбирая из двух пар катушек Гельмгольца ту, в которой на данный момент генерируется переменное магнитное поле с определенным значением индукции (рис. 2*а*). Во второй серии экспериментов («выбор 1 из 3») животные были обучены выбрать одну из трех пар катушек Гельмгольца, на которую подавался сигнал от генератора (рис. 2*б*).

Каждая из двух серий экспериментов состояла из двух идентичных этапов.

Первый этап заключался в предъявлении нового для тюленя стимула – магнитного поля частотой 8, 20 и 36 Гц (выбор частот обусловлен работами, проведенными нами ранее [16]) со значениями магнит-

ной индукции внутри катушек 110, 115 и 130 мкТл соответственно. Экспериментальный стенд закреплялся на уровне 10 см выше уреза воды. Ассистент, который управлял переключением генерации магнитного поля в катушках и давал сигнал тренеру о правильности выбора, располагался на стороне вольера с закрепленным стендом, вне поля зрения животного. Тренер занимал позицию на противоположной стороне вольера. Тюлень занимал стартовую позицию в воде на стороне вольера рядом с тренером. По команде «ищи» животное должно было подплыть к экспериментальному стенду и выбрать из двух или трех катушек ту, в которой на данный момент генерируется переменное магнитное поле. Выбор обозначался касанием тюленя мордой таргета желтого цвета, закрепленного в центре катушек Гельмгольца на экспериментальном стенде (рис. 1: 4). Верным выбор считался в том случае, если тюлень удерживал касание таргета более 4 секунд, после чего звучал бридж-сигнал и следовало пищевое подкрепление. Если тюлень выбирал катушку, не излучающую ЭМП, или удерживал таргет менее 4 секунд, выбор считался неверным и пищевого подкрепления не следовало.

Для каждого опыта составляли протокол проведения эксперимента, состоящий из 30 повторностей за тренировку, с порядком включения одной

из двух (в первой серии опытов) или одной из трех (во второй серии опытов) катушек Гельмгольца. Серия опытов состояла из 5 тренировок по 30 предъявлений в каждой, таким образом, количество предъявлений стимула (переменного магнитного поля) по каждой частоте в рамках одной серии опытов составило 150.

Последовательность включения катушек определялась псевдослучайным образом, с условием не более трех предъявлений одной и той же катушки подряд.

Второй этап заключался в проведении контрольных экспериментов с видеофиксацией для последующей обработки и статистического анализа после того, как все три экспериментальных животных научились уверенно определять катушки с магнитным полем, допустив различное количество ошибок в процессе обучения. Для каждого тюленя, задействованного в исследовании, были проведены 2 серии контрольных экспериментов («выбор 1 из 2» и «выбор 1 из 3») по каждой из исследуемых частот (8, 20 и 36 Гц).

Статистический анализ полученных результатов производили с помощью программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft, США).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью биномиального распределения полученных данных установлено, что результаты всех животных статистически значимы. Для каждой тренировки в отдельности, а затем для всей серии тренировок была рассчитана средняя доля верных выборов в процентах, со стандартным отклонением.

В первой серии экспериментов выбор осуществлялся из двух катушек Гельмгольца. Средние значения процента верных выборов для каждой из исследуемых частот представлены в таблице 1.

Во второй серии экспериментов выбор осуществлялся из трех катушек Гельмгольца. Средние значения процента верных выборов для каждой из исследуемых частот представлены в таблице 2.

Была проведена оценка динамики доли верных выборов в двух сериях экспериментов. Минимальная доля верных выборов, которая составила 70 %, в серии «выбор 1 из 2» наблюдалась у тюленя № 1 на первой и второй тренировках при частоте магнитного поля 20 Гц и на первой тренировке при частоте 36 Гц. В серии «выбор 1 из 3» минимальную долю верных выборов (70 %) так-

же показал тюлень № 1 на первой тренировке при частоте 36 Гц. Стоит отметить, что наименьший результат за две серии экспериментов показал тюлень № 3 при идентификации магнитного поля с частотой 36 Гц на второй тренировке – доля верных выборов в этот день не превысила 66,67 %. При этом тюлень № 1 и тюлень № 2 на этой тренировке отказались выполнять команды тренера. Результаты этих тренировок не учитывались в усредненной доле верных выборов, а на рисунке 3*а–е* этим тренировкам соответствует значение 0 %. Максимальные значения верных выборов наблюдались на четвертой и пятой тренировках у всех экспериментальных животных в обеих сериях экспериментов. 100 % верных выборов мы наблюдали только у тюленя № 2 на четвертой тренировке в серии экспериментов «выбор 1 из 2» при генерации магнитного поля частотой 36 Гц (рис. 3*а–в*).

Тюлени, принявшие участие в эксперименте, в совершенстве выполняли команды «ищи», «таргет», умели занимать стартовую позицию и ранее участвовали в экспериментах с дифференцировкой объектов по заданным характеристикам (цвет, звук, форма). Научение распознавать магнитное поле при условии, что серые тюлени способны воспринимать такой стимул, не должно было вызвать у нас затруднений. На практике тюлени № 2 и № 3 самостоятельно начали выбирать катушку Гельмгольца, на которую подавался сигнал, уже на первой тренировке. Тюленю № 1 на первой тренировке потребовалось указывать катушку, в которой генерировалось магнитное поле, поднося к ней сжатый кулак, сопровождая звуковой командой «таргет». Начиная со второй тренировки тюлень № 1 самостоятельно пытался идентифицировать нужную катушку. Для обучения тюленей идентифицировать магнитное поле в катушках Гельмгольца потребовалось 20 тренировок по 30 предъявлений стимула в каждой. К двадцатой тренировке у всех экспериментальных животных доля верных выборов превысила 65 %, и нами было принято решение о проведении контрольных испытаний.

За время проведения исследования всего было проведено 30 контрольных испытаний для каждого экспериментального тюленя, а общее количество предъявлений стимула (переменного магнитного поля) для каждого животного составило 900 раз. И лишь на одной тренировке тюлени № 1 и № 2 отказались выполнять команды. Оба животных вели себя пассивно, не выходили на помост, отказались от корма. Необходимо отметить, что на этой трени-

ровке и тюлень № 3 показал минимальную долю верных выборов за все серии контрольных испытаний. Поведение животного было тревожным, всплывая для выбора одной из катушек, тюлень часто оглядывался по сторонам, пугался постоянных звуков, резко уходя под воду. Причиной подобного поведения могло послужить множество факторов. Однако мы считаем наиболее вероятной причиной отказа от работы тюленей № 1 и № 2, а также низких результатов тюленя № 3 нахождение в непосредственной близости от вольеров дикого самца серого тюленя. Данная особь неоднократно регистрировалась нами неподалеку от вольерного комплекса в течение нескольких лет.

В обеих сериях контрольных испытаний лучший результат показал тюлень № 2. Минимальная доля верных выборов во всех испытаниях превышала 80 %. Данное животное ранее принимало участие в экспериментах по изучению влияния низкочастотных магнитных полей на поведение и устойчивость выполнения условных рефлексов [17; 18]. По всей видимости, искусственные магнитные поля для этой особи были уже знакомым стимулом, поэтому их распознавание вызвало меньше затруднений по сравнению с другими тюленями, принявшими участие в данных экспериментах. Тюлени № 1 и № 3 практически во всех контрольных экспериментах показали высокие значения доли верных выборов (более 70 %).

Необходимо отметить, что среднее количество верных выборов изменялось в зависимости от частоты генерируемого магнитного поля и величины магнитной индукции. В серии экспериментов «выбор 1 из 2» среднее значение верных выборов у всех испытуемых животных оказалось выше 85 % при частоте поля 8 Гц (магнитная индукция 110 мкТл), тогда как при частотах 20 и 36 Гц стабильно высокие показатели отмечены только у тюленя № 2. В экспериментах «выбор 1 из 3» доля верных выборов выше 85 % зафиксирована при генерации магнитного поля частотой 20 Гц (магнитная индукция 115 мкТл) у всех тюленей, а при частотах 8 и 36 Гц высокую стабильность верных выборов показал только тюлень № 2. В обеих сериях экспериментов у тюленей № 1 и № 3 средняя доля выборов была ниже при определении магнитного поля частотой 36 Гц (магнитная индукция 130 мкТл). Большая доля верных выборов при генерации магнитного поля частотой 8 и 20 Гц может быть связана с тем, что генерируемые частоты практически совпадают с первой и третьей гармоникой резонансов Шумана

**Таблица 1.** Среднее значение доли верных выборов (%) со стандартным отклонением в серии экспериментов «выбор 1 из 2»  
**Table 1.** Average percentage of correct choices (%) with standard deviation in the “choose 1 from 2” series of experiments

№ животного Animal No.	Частота переменного магнитного поля, Гц / Frequency of alternating magnetic field, Hz		
	8	20	36
Тюлень № 1 Seal No. 1	87,33 ± 7,23	81,33 ± 10,95	83,33 ± 11,30
Тюлень № 2 Seal No. 2	90,67 ± 3,27	88,00 ± 6,18	93,33 ± 5,27
Тюлень № 3 Seal No. 3	89,33 ± 5,48	79,33 ± 3,89	84,67 ± 6,05

(7,83 и 20,3 Гц), тогда как пятая гармоника (32,4 Гц) имеет разницу почти в 4 Гц с частотой поля, генерируемой в наших экспериментах (36 Гц). В научной литературе было обосновано предположение о том, что наиболее вероятным внешним источником синхронизации со средой обитания для гидробионтов является электромагнитное поле резонатора Земля – ионосфера преимущественно в области частот 7–32 Гц. Электромагнитное поле резонатора Земля – ионосфера существует с древнейших времен, и настройка гидробионтов на это поле представляется вполне естественной [19].

Полученные нами результаты согласуются с исследованиями, проведенными как отечественными, так и зарубежными авторами. Несмотря на то, что работы по изучению магниточувствительности у ластоногих в научной литературе практически не представлены, подобные исследования существуют для других представителей морских млекопитающих – китообразных.

**Таблица 2.** Среднее значение доли верных выборов (%) со стандартным отклонением в серии экспериментов «выбор 1 из 3»  
**Table 2.** Average percentage of correct choices (%) with standard deviation in the “choose 1 from 3” series of experiments

№ животного Animal No.	Частота переменного магнитного поля, Гц / Frequency of alternating magnetic field, Hz		
	8	20	36
Тюлень № 1 Seal No. 1	82,67 ± 5,47	86,67 ± 6,66	79,17 ± 8,33
Тюлень № 2 Seal No. 2	88,67 ± 5,58	91,33 ± 3,80	91,67 ± 1,92
Тюлень № 3 Seal No. 3	83,33 ± 6,67	87,33 ± 4,94	81,33 ± 12,15

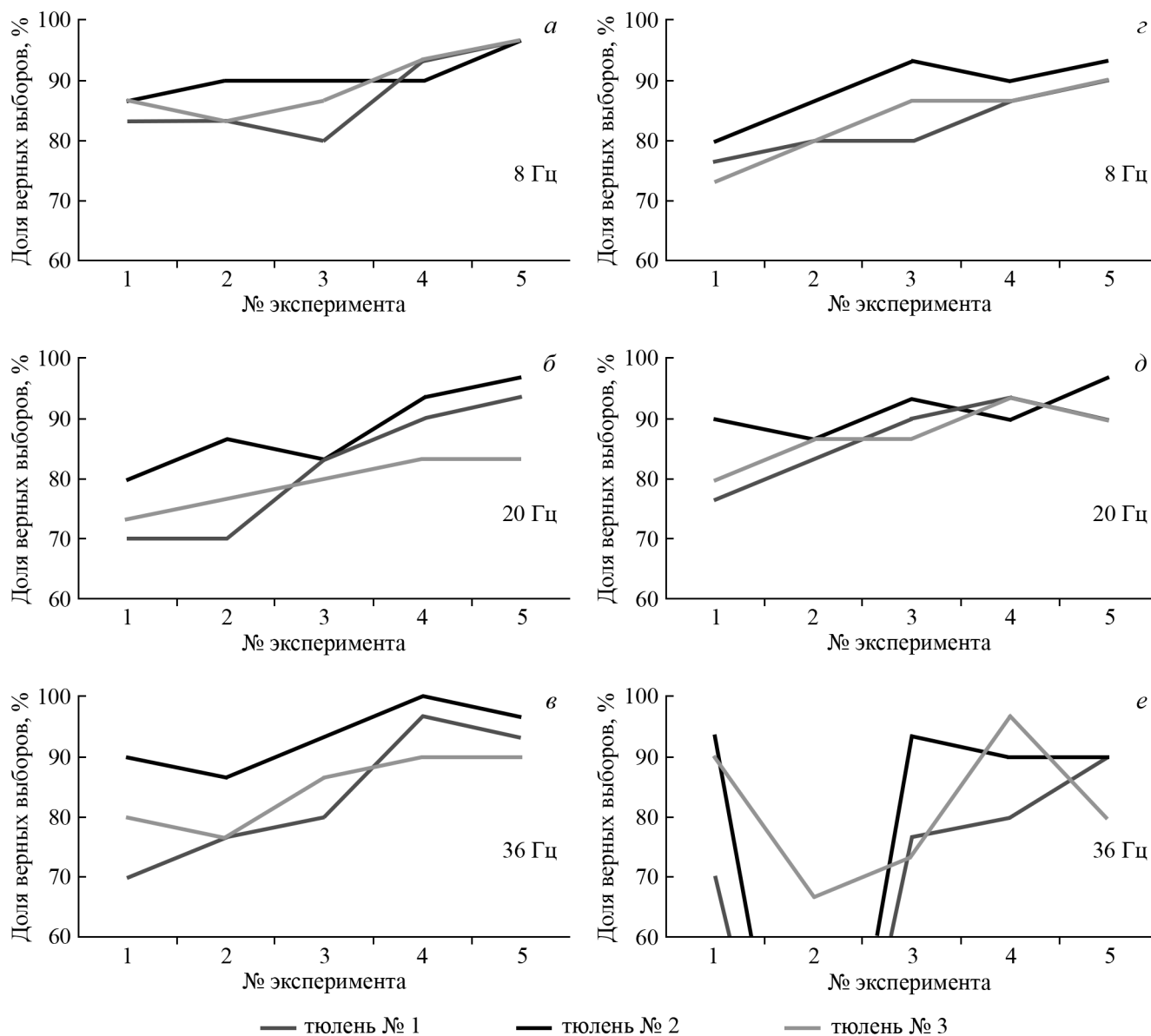


Рис. 3. Динамика доли верных выборов в процессе проведения контрольных экспериментов: а-в – серия «выбор 1 из 2»; з-е – серия «выбор 1 из 3».

Fig. 3. Dynamics of correct choice rate in the course of check tests: а-в – “choose 1 from 2” series; з-е – “choose 1 from 3” series.

В работе В.Б. Кузнецова [20] сообщалось, что физиологические параметры дельфинов, такие как электрокардиограмма, кожно-гальванические реакции и дыхание, изменялись при изменении постоянного магнитного поля. Была отмечена высокая чувствительность дельфина к экспозиции в постоянном магнитном поле.

Исследование, проведенное Д. Кремерс с соавторами на дельфинах-афалинах *Tursiops truncatus*, впервые экспериментально показало наличие магниторецепции у представителей китообразных [8]. Реакция шести содержащихся в неволе афалин на

визуально идентичные устройства, содержащие либо намагниченный, либо размагниченный блок неодима, позволила предположить, что этот вид способен воспринимать магнитные поля. Дельфины подходили к устройству с более короткой задержкой, когда оно содержало намагниченный неодимовый блок, по сравнению с контрольным, идентичным по форме и плотности.

А.А. Артемова с соавторами [21] оценила эффекты влияния космофизических факторов на работоспособность, исполнительность, качество, а также изменение скоростных показателей выполнения



поставленных задач дельфинами *Tursiops truncatus* путем мониторинговых наблюдений. В результате мониторинга были установлены статистически значимые различия между результатами выполнения дельфинами поставленных задач. В магнитоспокойные дни экспериментальные животные выполняли поставленные задачи с большим успехом, чем в магнитовозмущенные дни.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований нами было установлено, что искусственное низкочастотное переменное магнитное поле с индукцией 110–130 мкТл является для серых тюленей воспринимаемым стимулом, на предъ-

явление которого был выработан условный рефлекс. Все экспериментальные животные научились дифференцировать объект с магнитным полем из нескольких визуально идентичных объектов, со средней долей верных определений выше 79 %. Полученные данные позволяют утверждать, что представители семейства Phocidae Gray, 1825 серые тюлени *Halichoerus grypus* обладают магнито-рецепцией.

Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации, тема «Экология и физиология морских млекопитающих арктических морей» (государственный регистрационный номер 121091600101-6 (16/09/2021); № FMEE-2021-0009).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Winklhofer M. 2010. Magnetoreception. *Journal of the Royal Society Interface*. 7(2): 131–134. doi: 10.1098/rsif.2010.0010.focus
2. Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. 1979. Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria. *Science*. 203(4387): 1355–1356. doi: 10.1126/science.203.4387.1355
3. Kishkinev D., Chernetsov N., Pakhomov A., Heyers D., Mouritsen H. 2015. Eurasian reed warblers compensate for virtual magnetic displacement. *Current Biology*. 25(19): R822–R824. doi: 10.1016/j.cub.2015.08.012.
4. Бреус Т.К., Бинги В.Н., Петрукович А.А. 2016. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы. *Успехи физических наук*. 186(5): 568–576. doi: 10.3367/UFNr.2015.12.037693
5. Johnsen S., Lohmann K.J. 2008. Magnetoreception in animals. *Physics Today*. 61(3): 29–35. doi: 10.1063/1.2897947
6. Mouritsen H. 2018. Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature*. 558(7708): 50–59. doi: 10.1038/s41586-018-0176-1
7. Walker M.M., Kirschvink J.L., Ahmed G., Dizon A.E. 1992. Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *Journal of Experimental Biology*. 171(1): 67–78. doi: 10.1242/jeb.171.1.67
8. Kremers D., Marulanda J.L., Hausberger M., Lemasson A. 2014. Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields. *Naturwissenschaften*. 101(11): 907–911. doi: 10.1007/s00114-014-1231-x
9. Ferrari T.E. 2017. Cetacean beachings correlate with geomagnetic disturbances in Earth's magnetosphere: an example of how astronomical changes impact the future of life. *International Journal of Astrobiology*. 16(2): 163–175. doi: 10.1017/S1473550416000252
10. Kirschvink J.L., Dizon A.E., Westphal J.A. 1986. Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans. *Journal of Experimental Biology*. 120(1): 1–24. doi: 10.1242/jeb.120.1.1
11. Able K.P. 1980. Mechanisms of orientation, navigation, and homing. In: *Animal Migration, Orientation and Navigation*. New York, Academic Press: 283–373.
12. Kling J.W. 1971. Learning: Introductory survey. In: *Woodworth and Schlosberg's experimental psychology*. New York, Holt, Rinehart and Winston: 551–613.
13. Liboff A.R. 2014. Why are living things sensitive to weak magnetic fields? *Electromagnetic Biology and Medicine*. 33(3): 241–245. doi: 10.3109/15368378.2013.809579
14. Ioffe M.E. 2004. Brain mechanisms for the formation of new movements during learning: the evolution of classical concepts. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 34(1): 5–18. doi: 10.1023/B:NEAB.0000003241.12053.47
15. Mora C.V., Davison M., Wild M., Walker M.M. 2004. Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon. *Nature*. 432: 508–511. doi: 10.1038/nature03077
16. Яковлев А.П., Михайлюк А.Л., Григорьев В.Ф. 2016. Оценка изменений параметров поведения серого тюленя при воздействии на него электромагнитных полей экстремально низких частот в диапазоне 0,01–36 Гц. *Вестник МГТУ*. 19(1/2): 345–352. doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-345-352
17. Яковлев А.П., Ишкулов Д.Г., Зайцев А.А., Трошичев А.Р., Григорьев В.Ф. 2018. Влияние искусственных электромагнитных полей на частотах шумановского резонанса на двигательную активность серого тюленя. *Наука Юга России*. 14(4): 82–91. doi: 10.7868/S25000640180410
18. Яковлев А.П., Зайцев А.А., Ишкулов Д.Г., Григорьев В.Ф. 2019. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на работоспособность серых тюленей. *Вестник МГТУ*. 22(2): 266–275. doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-266-275
19. Муравейко А.В., Степанюк И.А., Муравейко В.М., Фролова Н.С. 2013. Эффекты влияния электромагнитных полей в области «шумановских резонансов» на активность гидробионтов. *Вестник МГТУ*. 16(4): 764–770.
20. Кузнецов В.Б. 1999. Вегетативные реакции дельфинов на изменение постоянного магнитного поля. *Биофизика*. 44(3): 496–502.

21. Артемова А.А., Романов Б.В., Григорьев П.Е. 2016. Влияние геомагнитной возмущенности на качество выполнения дельфинами поставленных задач. *Таврический медико-биологический вестник*. 19(4): 6–12.

## REFERENCES

1. Winklhofer M. 2010. Magnetoreception. *Journal of the Royal Society Interface*. 7(2): 131–134. doi: 10.1098/rsif.2010.0010.focus
2. Frankel R.B., Blakemore R.P., Wolfe R.S. 1979. Magnetite in freshwater magnetotactic bacteria. *Science*. 203(4387): 1355–1356. doi: 10.1126/science.203.4387.1355
3. Kishkinev D., Chernetsov N., Pakhomov A., Heyers D., Mouritsen H. 2015. Eurasian reed warblers compensate for virtual magnetic displacement. *Current Biology*. 25(19): R822–R824. doi: 10.1016/j.cub.2015.08.012
4. Breus T.K., Binhi V.N., Petrukovich A.A. 2016. Magnetic factor in solar-terrestrial relations and its impact on the human body: physical problems and prospects for research. *Physics-Uspexhi*. 59(5): 502–510. doi: 10.3367/UFNe.2015.12.037693
5. Johnsen S., Lohmann K.J. 2008. Magnetoreception in animals. *Physics Today*. 61(3): 29–35. doi: 10.1063/1.2897947
6. Mouritsen H. 2018. Long-distance navigation and magnetoreception in migratory animals. *Nature*. 558(7708): 50–59. doi: 10.1038/s41586-018-0176-1
7. Walker M.M., Kirschvink J.L., Ahmed G., Dizon A.E. 1992. Evidence that fin whales respond to the geomagnetic field during migration. *Journal of Experimental Biology*. 171(1): 67–78. doi: 10.1242/jeb.171.1.67
8. Kremers D., Marulanda J.L., Hausberger M., Lemasson A. 2014. Behavioural evidence of magnetoreception in dolphins: detection of experimental magnetic fields. *Naturwissenschaften*. 101(11): 907–911. doi: 10.1007/s00114-014-1231-x
9. Ferrari T.E. 2017. Cetacean beachings correlate with geomagnetic disturbances in Earth's magnetosphere: an example of how astronomical changes impact the future of life. *International Journal of Astrobiology*. 16(2): 163–175. doi: 10.1017/S1473550416000252
10. Kirschvink J.L., Dizon A.E., Westphal J.A. 1986. Evidence from strandings for geomagnetic sensitivity in cetaceans. *Journal of Experimental Biology*. 120(1): 1–24. doi: 10.1242/jeb.120.1.1
11. Able K.P. 1980. Mechanisms of orientation, navigation, and homing. In: *Animal Migration, Orientation and Navigation*. New York, Academic Press: 283–373.
12. Kling J.W. 1971. Learning: Introductory survey. In: *Woodworth and Schlosberg's experimental psychology*. New York, Holt, Rinehart and Winston: 551–613.
13. Liboff A.R. 2014. Why are living things sensitive to weak magnetic fields? *Electromagnetic Biology and Medicine*. 33(3): 241–245. doi: 10.3109/15368378.2013.809579
14. Ioffe M.E. 2004. Brain Mechanisms for the Formation of New Movements during Learning: The Evolution of Classical Concepts. *Neuroscience and Behavioral Physiology*. 34(1): 5–18. doi: 10.1023/B:NEAB.0000003241.12053.47
15. Mora C.V., Davison M., Wild M., Walker M.M. 2004. Magnetoreception and its trigeminal mediation in the homing pigeon. *Nature*. 432: 508–511. doi: 10.1038/nature03077
16. Yakovlev A.P., Mikhailyuk A.L., Grigor'ev V.F. 2016. [Evaluation of changes in the behavior of the grey seal exposed to the electromagnetic field of extremely low frequencies (0.01–36 Hz)]. *Vestnik of MSTU*. 19(1/2): 345–352. (In Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2016-1/2-345-352
17. Yakovlev A.P., Ishkulov D.G., Zaitsev A.A., Troshichev A.R., Grigoriev V.F. 2018. [The influence of artificial electromagnetic fields at frequencies of Schumann resonance on the physical activity of the grey seal]. *Nauka Yuga Rossii*. 14(4): 82–91. (In Russian). doi: 10.7868/S25000640180410
18. Yakovlev A.P., Zaytsev A.A., Ishkulov D.G., Grigoriev V.F. 2019. [The influence of low-frequency electromagnetic field on the operability of gray seals]. *Vestnik of MSTU*. 22(2): 266–275. (In Russian). doi: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-266-275
19. Muraveiko A.V., Stepanyuk I.A., Muraveiko V.M., Frolova N.S. 2013. [The effects of electromagnetic fields on the activity of marine organisms in the Schumann resonance area]. *Vestnik of MSTU*. 16(4): 764–770. (In Russian).
20. Kuznetsov V.B. 1999. Vegetative responses of dolphin to changes in the permanent magnetic field. *Biophysics*. 44(3): 488–494.
21. Artemova A.A., Romanov B.V., Grigoriev P.E. 2016. [The impact of geomagnetic disturbances on the quality and performance of tasks fulfilment by dolphins]. *Tavricheskiy mediko-biologicheskiiy vestnik*. 19(4): 6–12. (In Russian).

Поступила 29.06.2023

Подписано к печати 30.08.2023. Дата выхода в свет 29.09.2023.

Формат 60×88%

Цифровая печать. Усл. печ. л. 12,25. Тираж 200 экз. Зак. № 27. Цена свободная

Учредители: Российская академия наук,

Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук

Издатель: ФГБУ «Издательство «Наука», 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-77891 от 19 февраля 2020 г.,  
выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций  
16+

Отпечатано в ФГБУ «Издательство «Наука» (Типография «Наука»), 121099, Москва, Шубинский пер., 6