

УДК 57.045

Влияние низкочастотного электромагнитного поля на работоспособность серых тюленей

А. П. Яковлев*, А. А. Зайцев, Д. Г. Ишкулов, В. Ф. Григорьев

*Мурманский морской биологический институт, г. Мурманск, Россия;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>, e-mail: xloroplast@mail.ru

Информация о статье Реферат

Поступила в редакцию 05.03.2019;
Получена после доработки 13.05.2019

Серые тюлени широко используются в биотехнических системах различного назначения. При исследовании влияния искусственного электромагнитного поля (ЭМП) частотой 8 Гц на работоспособность серых тюленей использован метод условных рефлексов (один из наиболее информативных методов экспериментального изучения функционального состояния высших отделов центральной нервной системы). В эксперименте были задействованы две половозрелые самки серого тюленя; для каждой особи проведено по две серии опытов. Первая серия экспериментов осуществлялась в условиях естественного (фонового) геомагнитного поля. При проведении второй серии экспериментов на особи серых тюленей воздействовали искусственным электромагнитным полем на протяжении всех тренировок. Критерием оценки влияния ЭМП на работоспособность животных было выполнение навыков обусловленного поведения. В ходе изучения контролировались следующие параметры инструментальных рефлексов: среднее время удержания целевого указателя (команда "Таргет!"); среднее время поиска мишени (команда "Ищи!"); общее время, затраченное на проведение тренировки; количество ошибок, совершенных тюленем за тренировку. В результате указанных исследований установлено, что испытываемые животные характеризуются сходными свойствами высшей нервной деятельности. Эксперименты без воздействия электромагнитного поля показали сопоставимые значения времени удержания целевого указателя, поиска мишени и количества допущенных ошибок. При проведении тренировок с воздействием искусственного низкочастотного электромагнитного поля животные были более возбужденными, совершали большее количество ошибок при выполнении команд; время удержания целевого указателя значительно сократилось, а время поиска мишени выросло в полтора раза. Таким образом, при экспозиции серых тюленей в искусственном электромагнитном поле частотой 8 Гц наблюдается раздражающее, вызывающее тревогу воздействие данного поля, которое проявляется в снижении эффективности реализации инструментальных условных рефлексов, что свидетельствует о снижении уровня работоспособности серых тюленей.

Ключевые слова:

серые тюлени, электромагнитное поле, работоспособность, воздействие, условный рефлекс

Для цитирования

Яковлев А. П. и др. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на работоспособность серых тюленей. Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 2. С. 266–275. DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-266-275.

The influence of low-frequency electromagnetic field on the operability of gray seals

A. P. Yakovlev*, A. A. Zaytsev, D. G. Ishkulov, V. F. Grigoriev

*Murmansk Marine Biological Institute Murmansk, Russia;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>, e-mail: xloroplast@mail.ru

Article info

Abstract

Received 05.03.2019;
received in revised 13.05.2019

Gray seals are widely used in biotechnical systems for various purposes. In the study of the effect of an artificial electromagnetic field (EMF) with 8 Hz frequency on the performance of gray seals, the method of conditioned reflexes has been used (one of the most informative for experimentally studying the functional state of the higher divisions of the Central nervous system). Two adult female grey seal have been used in the experiment; two series of experiments have been conducted for each individual gray seal. The first series of experiments has been conducted in the conditions of natural (background) geomagnetic field. During the second series of experiments, individuals of gray seals have been affected by an artificial electromagnetic field throughout the training. The criterion for assessing the effect of EMF on the operability of animals is the implementation of skills due to their behavior. During the study, the following parameters of instrumental reflexes have been monitored: the average retention time of the target pointer (the Target command); average target search time (the Search command); total time spent on training; the number of mistakes made by the seal per workout. It has been shown that experimental animals are characterized by similar properties of higher nervous activity. Experiments without exposure to an electromagnetic field have shown comparable values of the target index hold time, target search, and the number of errors made. When conducting training with the effects of artificial low-frequency electromagnetic field, the animals were more excited, made more errors when executing commands; the target pointer hold time was significantly reduced, and the target search time increased by one and a half times. Thus, when exposing gray seals in the artificial electromagnetic field with the frequency of 8 Hz, an annoying, alarming effect of this field has been observed manifesting itself in a decrease in the effectiveness of instrumental conditioned reflexes that means reducing the operability of gray seals.

Key words:

grey seals, electromagnetic field, operability, impact, reflex

For citation

Yakovlev A. P. et al. The influence of low-frequency electromagnetic field on the operability of gray seals. *Vestnik of MSTU*, 22(2), pp. 266–275. (In Russ.) DOI: 10.21443/1560-9278-2019-22-2-266-275.

Введение

В процессе зарождения и эволюции жизни на Земле природные электромагнитные поля (ЭМП) взаимодействовали с биоэлектрическими процессами, присущими живой материи, и оказывали влияние на состояние и функционирование организмов (Бинги, 2012), что способствовало развитию механизмов восприятия (магниторецепции) и использования указанных полей, а также формированию в процессе эволюции способов защиты от повреждающего воздействия ЭМП. Живые организмы приспособились к определенному уровню электромагнитных полей, поэтому резкое повышение этого уровня вызывает напряжение их адаптационно-компенсаторных возможностей (Еськов и др., 2008).

В настоящее время произошли изменения в структуре источников ЭМП, связанные с возникновением их новых видов, освоением различных частотных диапазонов теле- и радиовещания, развитием средств дистанционного наблюдения и контроля и т. д. Особенностью этих источников является создание равномерной зоны радиопокрытия, что приводит к увеличению электромагнитного фона в окружающей среде (Еськов и др., 2008; Бреус и др., 2016). Значительные отклонения ЭМП от естественного уровня выходят за границы оптимума жизнедеятельности живых организмов и являются стрессовым фактором (Еськов и др., 2008; Биогеенный магнетит..., 1989). Экспериментальные данные, полученные как отечественными, так и зарубежными исследователями, свидетельствуют о высокой биологической активности ЭМП во всех частотных диапазонах (Еськов и др., 2008; Walker et al., 2002; Zapka et al., 2009; Жаворонков и др., 2011).

Биологические эффекты ЭМП детерминируются, с одной стороны, их параметрами, а с другой – физико-химическими свойствами биообъектов. Многообразие данных свойств, соответствующих различным уровням организации живой материи, порождает высокую вариабельность реагирования различных организмов на сходные параметры электромагнитного воздействия (Бинги, 2012; Еськов и др., 2008). Под влиянием ЭМП изменяется поведение животных, их двигательная активность, ориентация в пространстве, способность к выработке условных рефлексов (Холодов, 1975; Эльгард и др., 1964; Павлова и др., 2010; 2012; 2016).

Влияние слабого низкочастотного электромагнитного поля определяется с использованием моделей, раскрывающих природу магниторецепции живых систем. Феноменологические модели не затрагивают природу явления, предлагая лишь математические средства (уравнения химической кинетики) для описания внешних эффектов от воздействия электромагнитных полей: стохастического резонанса как усилительного механизма в магнитобиологии; магниточувствительных фазовых переходов в биофизических системах, рассматриваемых в качестве жидких кристаллов (к которым относят и мембранные белки) и т. д. (Бинги, 2002).

Макро- и микроскопические описания касаются физико-химических механизмов разных уровней, раскрывающих реакции живых систем на воздействия ЭМП (Бинги, 2002). С помощью макроскопических моделей изучаются биомагнетизм и ферромагнитное загрязнение; джоулево тепло и вихревые электрические токи, индуцируемые переменными ЭМП; сверхпроводимость на уровне клеточных структур и альфа-спиральных белковых молекул; магнитогидродинамика макроскопических кластеров ионов (Бинги, 2002). Микроскопические модели описывают движение заряженных частиц в ЭМП (в том числе осцилляторные, интерференционные эффекты, реакции с участием свободных радикалов, коллективные возбуждения многочастичных систем); биологически активные метастабильные состояния жидкой воды, чувствительные к вариациям ЭМП (Бинги, 2002).

Большинство воздействующих на живой организм частот ЭМП находятся в интервале 0,01–60 Гц и совпадают с ритмами функционирования головного мозга, нервной системы, сердца и других систем организма (Хабарова, 2002). Преобразование сигнала ЭМП в биологический отклик происходит в несколько этапов, каждому из которых соответствует свой механизм: изменения состояния первичной биофизической мишени влекут изменения на уровне систем и далее на уровне поведения целостного организма (Бинги, 2016).

Центральная нервная система (ЦНС) обеспечивает развитие общего адаптационного синдрома; ей отводится основная роль в формировании ответа организма животных и человека на электромагнитные поля нетепловой интенсивности (Павлова и др., 2010; Холодов, 1996; 1998; Лукьянова, 2013; 2015). С изменением состояния ЦНС (динамических взаимоотношений между процессами возбуждения и торможения) многие авторы связывают проявление магнитных биологических эффектов низкоинтенсивных ЭМП (Лукьянова, 2002).

Морские млекопитающие, в частности серые тюлени, широко используются в биотехнических системах различного назначения; главным критерием работоспособности таких систем является надежность выполнения команд, устойчивая демонстрация навыков и условных рефлексов на определенных временных интервалах (Матишов и др., 2010). Результаты предыдущих исследований (Яковлев и др., 2017; 2018) показали, что воздействие на серых тюленей низкочастотным электромагнитным полем на протяжении различных отрезков времени влечет изменения в поведении и двигательной активности этих животных (степень влияния и характер оказываемых воздействий зависят от длительности экспозиции и частоты ЭМП).

В научной литературе отсутствуют данные о влиянии ЭМП на высшую нервную деятельность ластоногих, поэтому представляется целесообразным изучение воздействия электромагнитных полей

на деятельность ЦНС серых тюленей, в частности на устойчивость закрепления инструментальных условных рефлексов. Цель настоящего исследования заключается в определении влияния искусственного электромагнитного поля частотой 8 Гц на работоспособность серых тюленей.

Материалы и методы

В ходе исследований, проведенных в 2015–2016 гг. в биофизическом комплексе в г. Мурманске, были поэтапно задействованы две половозрелые самки серого тюленя (*Halichoerus grypus* Fabricius, 1791) по кличкам Соня (возраст 11 лет, экспериментальные работы с ее участием выполнены в 2015 г.) и Бузя (возраст 12 лет, экспериментальные работы – в 2016 г.).

Тюлени содержатся в аквакомплексе Мурманского морского биологического института (ММБИ), расположенном на акватории Кольского залива (г. Полярный), в условиях, приближенных к естественной среде их обитания; они прошли курс общей подготовки, выполняют широкий спектр команд, неоднократно участвовали в экспериментах различной направленности, имеют стойкую установку на обучение.

Из открытого вольерного аквакомплекса ММБИ животные транспортировались в биофизический исследовательский комплекс в г. Мурманске, созданный ММБИ совместно с Полярным геофизическим институтом. После транспортировки в биофизический комплекс тюлени адаптировались к новым условиям в течение 14 суток. Животные содержались в пресной воде; температурный и световой режимы в помещении на протяжении проведения всех экспериментов оставались неизменными. Состав и количество корма были постоянными в течение всего периода содержания животных в указанном комплексе.

Биофизический исследовательский комплекс включает помещение с бассейном, аппаратную комнату, два подсобных помещения. Для обеспечения комфортных условий содержания тюленя в бассейне смонтирован помост. Благодаря наличию изолированной от основного помещения с бассейном аппаратной удалось исключить влияние на животных акустических шумов, создаваемых исследовательским оборудованием во время проведения экспериментов.

Источник электромагнитного поля содержал задающий генератор с возможностью установления несущей частоты в диапазоне 0,01–36 Гц; излучающую антенну, огибающую бассейн по периметру с образованием горизонтальной рамки (*Устройство для исследования...*, 2016). Напряженность искусственного электромагнитного поля синусоидальной формы, подаваемого на излучающую антенну, составляла 45–50 А/м.

В экспериментальной работе использовались условные рефлексы как один из наиболее информативных методов изучения функционального состояния высших отделов ЦНС (*Павлова и др.*, 2013). Исследование влияния искусственных низкочастотных электромагнитных полей на работоспособность серых тюленей осуществлялось в несколько этапов.

Первый этап эксперимента включал 5 тренировок по контролю выполнения ранее сформированных навыков обусловленного поведения – инструментальных рефлексов на команды "Таргет!" и "Ищи!", а также бридж-сигнал (специальный звуковой стимул, ассоциирующийся у тюленя с положительным пищевым подкреплением). На первой тренировке тюленя знакомили с мишенью – кеглей красного цвета длиной 25 см и диаметром 8 см, закрепленной с помощью веревки у борта бассейна на 10–15 см выше уровня среза воды, и таргетом (целевым указателем) – шестом с желтым пластиковым шаром на конце (рис. 1).

Тренировки проводили в утренние часы (с 10:00), всего за тренировку подавалось 40 команд (по 20 команд "Таргет!" и "Ищи!"). Тренировочный процесс был организован следующим образом: тюлень занимал стартовую позицию у борта бассейна; ему предъявлялся целевой указатель с одновременной звуковой командой "Таргет!"; тюлень должен был коснуться носом указателя (желтого шара) и удерживать такое положение как можно дольше; как только животное отводило нос от таргета, следовал бридж-сигнал и пищевое подкрепление. Затем тюлень занимал стартовую позицию у того же борта бассейна, после чего подавалась звуковая команда "Ищи!". Животное должно было проплыть до противоположного борта бассейна и коснуться носом мишени (красной кегли), после чего звучал бридж-сигнал и следовало пищевое подкрепление. В случае невыполнения поданной команды или своевольного оставления стартовой позиции пищевое подкрепление отсутствовало. Результаты 5 контрольных тренировок свидетельствовали о стабильности выполнения тюленями выработанных инструментальных условных рефлексов.

Второй этап эксперимента заключался в проведении 15 тренировок (с видеофиксацией). На каждой тренировке подавалось по 20 команд "Таргет!" и "Ищи!". Животное в течение тренировки могло получить 40 пищевых поощрений; каждое неверное предъявление отнимало одно поощрение. На данном этапе фиксировались следующие параметры: время удержания целевого объекта, с, по команде "Таргет!"; время поиска предмета (мишени), с, по команде "Ищи!"; количество ошибок. Ошибкой считалось "неправильное" поведение животного: по ряду причин тюлень не всегда выполнял команду тренера; не дождавшись команды, самовольно уплывал к целевому раздражителю; покидал стартовую позицию. В ходе экспериментов также указывалась общая продолжительность каждой тренировки (от подачи первой команды до фиксации экспериментатором выполнения животным последней из общего числа команд).

Третий этап эксперимента содержал 15 аналогичных тренировок. Основное отличие от второго этапа заключалось в том, что серых тюленей во время тренировок подвергали воздействию искусственного низкочастотного электромагнитного поля частотой 8 Гц. Фиксировался аналогичный перечень контрольных параметров.



Рис. 1. Знакомство животного с мишенью (1) и целевым указателем (2)
Pic. 1. Familiarization of an animal with a target (1) and a target index (2)

На протяжении периода исследования осуществлялся контроль состояния животных: они были здоровы, поддерживался высокий уровень пищевой мотивации. На всех этапах работы поощрение было пищевым с использованием равных по массе кусочков сельди атлантической и путассу.

Видеофиксацию хода эксперимента осуществляли с помощью видеокамеры наружного наблюдения, TV-тюнера, подключенного к персональному компьютеру, и переносной видеокамеры Panasonic SDR-H40, установленной на штатив.

При обработке полученных данных применялись методы описательной статистики. Для оценки достоверности различий между массивами данных использовали *U*-критерий Манна – Уитни. Статистическая обработка осуществлялась с помощью программного обеспечения Microsoft Excel (Microsoft, USA) и Statistica 6.0 (StatSoft, USA).

Результаты и обсуждение

Контроль скорости подхода животного к мишени и времени удержания целевого объекта позволяет оценить наличие (отсутствие) отвлекающих, тревожных или опасных факторов, оказывающих влияние на скорость выполнения команд или способность животного сосредоточивать внимание на определенном действии. Иными словами, подобный подход позволяет оценить уровень работоспособности серого тюленя при воздействии каких-либо раздражающих факторов.

В процессе экспериментов в качестве раздражающего фактора применялось искусственное электромагнитное поле частотой 8 Гц. Выбор частоты электромагнитного поля осуществлялся на основе литературных данных (*Биогенный магнетит...*, 1989; *Холодов*, 1975; 1996; *Бинги*, 2002), свидетельствующих о наличии магнитных биологических эффектов у живых систем, подверженных экспозиции в электромагнитных полях с данными частотными характеристиками. Следует также отметить, что частота 8 Гц близка по значению к первой моде шумановских резонансов (7,62 Гц), которые возникают во время геомагнитных бурь, обусловленных различными гидрометеорологическими процессами (резким смещением мощных циклонов и антициклонов; штормами; ураганами и т. д.) и землетрясениями (*Муравейко и др.*, 2013).

Для оценки влияния ЭМП на работоспособность серых тюленей выполнены две серии экспериментов, каждая из которых включала 15 тренировок. Первая серия экспериментов проведена в условиях естественного (фонового) геомагнитного поля; в ходе второй серии экспериментов на особой серого тюленя воздействовало искусственное электромагнитное поле.

В результате проведения указанных экспериментов были получены значения следующих контролируемых параметров: среднее время удержания целевого указателя (команда "Таргет!"); среднее время поиска мишени (команда "Ищи!"); общее время, затраченное на проведение тренировки; количество ошибок, совершенных тюленем в течение тренировки.

Максимальное время, затраченное серым тюленем по кличке Соня (табл. 1) на тренировку без воздействия ЭМП, составило 31 мин 48 с, минимальное – 25 мин 39 с. В эксперименте с экспозицией тюленя в электромагнитном поле максимальное время тренировки составило 34 мин 49 с, минимальное – 28 мин 33 с. Анализ полученных массивов данных на основе U -критерия Манна – Уитни позволил выявить достоверные отличия (при уровне значимости $p \leq 0,05$) общей продолжительности тренировки ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 26,5$), среднего времени удержания целевого указателя – таргета ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 0$), среднего времени выполнения команды "Ищи!" ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 0$), количества ошибок, совершенных животным в каждой серии экспериментов ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 66$), в экспериментах без воздействия электромагнитного поля и при экспозиции животного в нем.

Таблица 1. Среднее время удержания целевого указателя (команда "Таргет!") и выполнения команды "Ищи!" серым тюленем по кличке Соня без воздействия искусственного ЭМП и при его воздействии
Table 1. The mean retention time of the target pointer (the Target command) and the execution of the Search for command without the effect of the artificial low-frequency EMF and under its influence. Gray seal Sonya

Номер тренировки	Общая продолжительность тренировки, мин		Среднее время выполнения команды, с				Количество ошибок	
	Без ЭМП	При ЭМП	"Таргет!"		"Ищи!"		Без ЭМП	При ЭМП
			Без ЭМП	При ЭМП	Без ЭМП	При ЭМП		
1	31,03	33,28	14,6 ± 2,39	8,6 ± 2,60	4,4 ± 0,8	7,0 ± 1,1	3	6
2	29,46	32,59	13,6 ± 1,90	8,4 ± 2,44	4,8 ± 1,2	6,2 ± 1,4	4	5
3	27,57	31,45	14,1 ± 1,42	11,6 ± 2,61	5,5 ± 0,9	6,5 ± 1,8	2	6
4	27,35	30,48	14,2 ± 2,23	8,6 ± 2,60	4,9 ± 1,1	7,2 ± 1,6	0	4
5	28,11	28,35	15,9 ± 1,98	8,6 ± 2,58	3,4 ± 1,2	6,4 ± 1,7	0	3
6	29,29	28,33	14,4 ± 1,44	9,9 ± 2,32	4,3 ± 1,0	6,1 ± 1,6	1	4
7	31,48	28,34	16,7 ± 1,92	10,9 ± 2,56	5,4 ± 1,3	7,3 ± 1,4	2	2
8	26,33	29,56	17,6 ± 0,96	8,5 ± 1,92	4,1 ± 1,0	7,6 ± 1,2	3	1
9	26,28	33,51	13,5 ± 1,54	10,0 ± 2,38	3,9 ± 0,8	6,7 ± 1,8	2	0
10	28,56	34,49	17,9 ± 1,47	11,9 ± 2,74	4,8 ± 1,4	7,5 ± 1,5	2	3
11	30,12	33,12	12,4 ± 1,72	9,6 ± 1,94	4,2 ± 0,7	5,6 ± 1,3	0	2
12	28,33	32,03	16,8 ± 1,18	11,8 ± 1,69	4,3 ± 1,1	7,0 ± 1,1	1	0
13	27,18	31,12	17,2 ± 1,21	8,6 ± 2,02	4,9 ± 0,8	6,4 ± 1,4	0	3
14	28,18	31,40	12,4 ± 1,42	11,2 ± 2,42	5,5 ± 0,6	6,7 ± 1,8	0	0
15	25,39	32,31	14,9 ± 1,76	8,5 ± 2,86	4,7 ± 1,4	5,9 ± 1,5	0	2

Максимальное время, затраченное серым тюленем по кличке Бузя (табл. 2) на тренировку без воздействия ЭМП, составило 34 мин 55 с, минимальное – 27 мин 53 с. В эксперименте с экспозицией тюленя в электромагнитном поле максимальное время тренировки составило 38 мин 45 с, минимальное – 32 мин 37 с. Анализ полученных массивов данных на основе U -критерия Манна – Уитни позволил выявить достоверные отличия (при уровне значимости $p \leq 0,05$) общей продолжительности тренировки ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 10$), среднего времени удержания целевого указателя – таргета ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 0$), среднего времени выполнения команды "Ищи!" ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 0$), количества ошибок, совершенных животным в каждой серии экспериментов ($U_{кр} = 72$; $U_{эмп} = 62,5$), в экспериментах без воздействия электромагнитного поля и при экспозиции животного в нем.

Данные, указанные в табл. 1 и 2, свидетельствуют о незначительном уменьшении общей продолжительности последних тренировок в сравнении с первыми, а также о сокращении количества ошибок, совершенных животными в последних опытах серии в сравнении с первыми экспериментами.

В процессе исследования получены усредненные значения всех контролируемых параметров исходя из результатов 15 тренировок в каждой серии экспериментов. Средняя продолжительность тренировки тюленя по кличке Соня составила 28 мин 31 с при фоновых значениях геомагнитного поля и 31 мин 35 с при экспозиции животного в искусственном ЭМП. Средняя продолжительность тренировки тюленя по кличке Бузя составила 31 мин 27 с при фоновом геомагнитном поле и 36 мин 27 с при воздействии ЭМП. Среднее

количество ошибок, допущенных тюленем по кличке Соня за тренировку, составило 1,33 в серии тренировок без воздействия ЭМП и возросло до 2,73 ошибок в серии тренировок с экспозицией животного в искусственном электромагнитном поле. Серый тюлень по кличке Бузя допускал 1,47 ошибки за тренировку в серии экспериментов без воздействия ЭМП и 3,20 ошибок за тренировку в экспериментах с экспозицией в электромагнитном поле.

Таблица 2. Среднее время удержания целевого указателя (команда "Таргет!") и выполнения команды "Ищи!" серым тюленем по кличке Бузя без воздействия искусственного ЭМП и при его воздействии
Table 2. The mean retention time of the target pointer (the Target command) and the execution of the Search for command without the effect of the artificial low-frequency EMF and under its influence. Gray seal Buzya

Номер тренировки	Общая продолжительность тренировки, мин		Среднее время выполнения команды, с				Количество ошибок	
	Без ЭМП	При ЭМП	"Таргет!"		"Ищи!"		Без ЭМП	При ЭМП
			Без ЭМП	При ЭМП	Без ЭМП	При ЭМП		
1	33,54	35,29	22,1 ± 2,43	13,2 ± 1,72	4,1 ± 1,2	8,3 ± 1,0	4	7
2	32,39	37,29	19,3 ± 2,04	13,1 ± 2,12	5,4 ± 0,8	7,8 ± 1,4	2	5
3	29,18	36,46	20,2 ± 2,39	8,9 ± 1,88	5,6 ± 1,5	6,7 ± 1,3	5	4
4	30,23	34,59	15,3 ± 1,69	14,8 ± 1,96	4,7 ± 1,4	8,2 ± 1,2	1	3
5	34,26	35,56	18,1 ± 1,70	9,5 ± 1,91	5,6 ± 1,3	8,0 ± 1,3	2	1
6	29,45	37,24	15,9 ± 1,89	10,7 ± 2,59	3,8 ± 1,1	7,8 ± 1,0	1	5
7	28,07	38,26	20,5 ± 2,21	8,6 ± 2,14	4,2 ± 0,8	7,4 ± 1,2	2	3
8	34,36	34,45	22,4 ± 2,62	12,8 ± 2,26	5,5 ± 0,9	7,5 ± 1,4	0	5
9	27,53	36,35	15,4 ± 2,23	13,0 ± 2,66	4,1 ± 0,7	7,9 ± 1,0	2	6
10	29,08	34,56	21,6 ± 1,69	10,9 ± 1,75	4,0 ± 1,4	6,3 ± 1,1	0	0
11	29,27	38,45	18,4 ± 2,62	9,5 ± 1,83	5,9 ± 1,2	6,6 ± 1,0	0	5
12	30,24	33,39	16,5 ± 2,52	14,5 ± 1,89	5,8 ± 1,5	6,8 ± 1,4	1	1
13	32,28	37,32	15,0 ± 2,18	14,3 ± 1,84	5,1 ± 1,0	6,3 ± 1,5	0	2
14	34,55	36,53	16,8 ± 1,84	10,9 ± 1,63	4,3 ± 1,4	8,1 ± 1,4	0	1
15	30,08	32,37	20,7 ± 2,07	8,5 ± 2,22	4,9 ± 0,9	7,2 ± 1,1	2	0

Средние значения общего времени проведения тренировок и количества совершаемых тюленями ошибок представлены на рис. 2. Средняя продолжительность тренировок обоих животных в опытах без воздействия ЭМП имеет различные значения, что связано с их индивидуальными особенностями, при этом в опытах с использованием электромагнитного поля среднее время тренировки тюленей незначительно увеличилось. Иная картина наблюдалась с ростом среднего количества допущенных ошибок испытуемыми животными в течение тренировки: в экспериментах без воздействия ЭМП отмечалось достаточно низкое количество ошибок; при проведении тренировок с экспозицией тюленей в искусственном низкочастотном ЭМП среднее количество неверных выполнений команд выросло более чем в два раза. Тюлени гораздо чаще отказывались выполнять команды тренера или занимать стартовую позицию при воздействии на них электромагнитного поля.

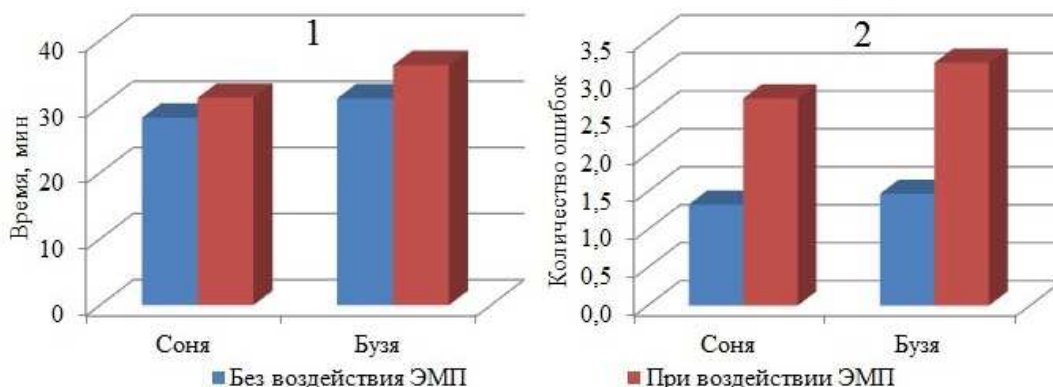


Рис. 2. Средние значения продолжительности тренировки (1) и количества ошибок, совершаемых тюленями в течение тренировки (2), в экспериментах без воздействия ЭМП и при его воздействии
Pic.2. The mean duration of training (1) and the mean number of errors committed by the seals per training (2) in experiments without exposure to low-frequency EMF and with its impact

Средние значения времени удержания целевого указателя (команда "Таргет!") и поиска мишени (команда "Ищи!") отражены на рис. 3. Без воздействия электромагнитного поля среднее время удержания таргета было достаточно продолжительным у тюленей по кличкам Соня и Бузя и составило 15,08 и 18,54 с соответственно. При проведении тренировок с экспозицией животных в искусственном ЭМП среднее время удержания целевого указателя составило 9,78 (Соня) и 11,55 с (Бузя), что в полтора раза меньше значений, полученных в первых сериях тренировок. Напротив, среднее время выполнения команды "Ищи!" увеличилось в сериях тренировок с экспозицией тюленей в ЭМП и составило 6,67 (Соня) и 7,39 с (Бузя), а на тренировках без воздействия электромагнитного поля среднее время выполнения данной команды составляло 4,61 и 4,87 с соответственно.

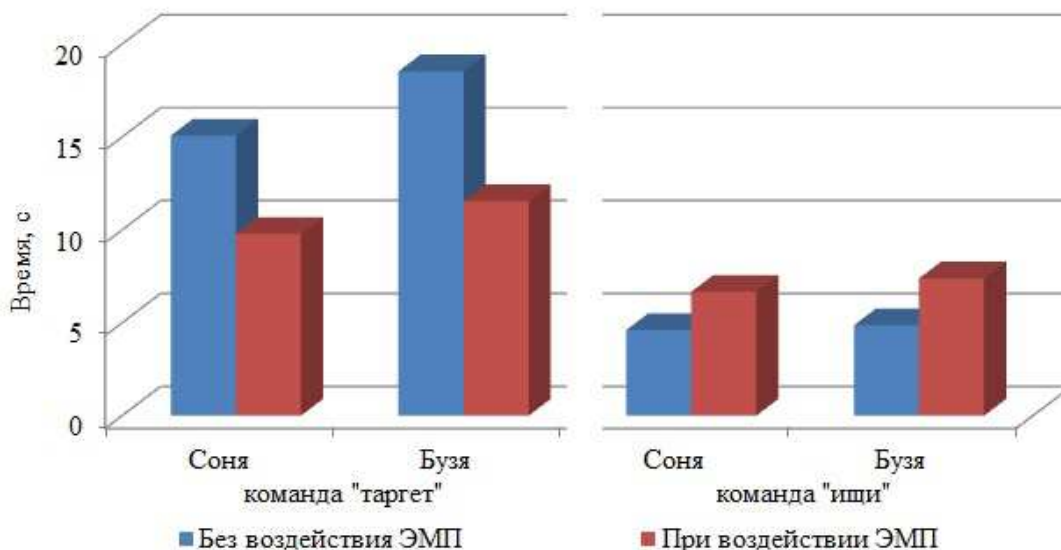


Рис. 3. Средние значения времени удержания целевого указателя и поиска мишени тюленями в экспериментах без воздействия искусственного ЭМП и при его воздействии

Fig. 3. The mean retention time of the target pointer (the Target command) and the mean search time for the target (the Search command) by Sonya and Buzya seals in experiments without the effect of the artificial low-frequency pulse and when it is exposed

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что подопытные животные имеют сходные свойства высшей нервной деятельности. При выполнении тренировочных заданий без воздействия электромагнитного поля отмечены сопоставимые значения времени удержания целевого указателя (команда "Таргет!") и поиска мишени (команды "Ищи!"), а также количества допущенных ошибок в течение экспериментов, а незначительную разницу этих величин можно объяснить индивидуальными особенностями каждого из тюленей.

При проведении тренировок с воздействием искусственного низкочастотного электромагнитного поля экспериментальные животные были более возбуждены, совершали большее количество ошибок при выполнении команд, время удержания целевого указателя (команда "Таргет!") сократилось, а время поиска мишени (команда "Ищи!") увеличилось практически в полтора раза.

Анализ совокупности полученных данных позволяет утверждать, что при экспозиции животных в искусственном электромагнитном поле частотой 8 Гц наблюдается раздражающее, вызывающее проявление признаков тревоги воздействие данного поля, проявляющееся в снижении эффективности реализации инструментальных условных рефлексов, т. е. в уменьшении уровня работоспособности серых тюленей.

Библиографический список

1. Бинги В. Н. Два типа магнитных биологических эффектов: индивидуальный и групповой // Биофизика. 2012. Т. 57, № 2. С. 338–345.
2. Бинги В. Н. Первичный физический механизм биологических эффектов слабых магнитных полей // Биофизика. 2016. Т. 61, № 1. С. 201–208.
3. Бинги В. Н. Магнитобиология: эксперименты и модели. М. : МИЛТА, 2002. 592 с.
4. Биогенный магнетит и магниторецепция. Новое о биомagnetизме : в 2 т. / под ред. Дж. Киршвинка [и др.] ; пер. с англ. М. : Мир, 1989. Т. 1. 352 с.
5. Бреус Т. К., Бинги В. Н., Петрукович А. А. Магнитный фактор солнечно-земных связей и его влияние на человека: физические проблемы и перспективы // Успехи физических наук. 2016. Т. 186, № 5. С. 568–576. DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037693.

6. Еськов Е. К., Тобоев В. А. Воздействие искусственно генерируемых электромагнитных полей на биологические объекты // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 28–36.
7. Жаворонков Л. П., Дубовик Б. В., Павлова Л. Н., Колганова О. И. [и др.]. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМП низкой интенсивности на общую возбудимость ЦНС // Радиация и риск. 2011. Т. 20, № 2. С. 64–74.
8. Лукьянова С. Н. Феноменология и генез изменений в суммарной биоэлектрической активности головного мозга на электромагнитное излучение // Радиационная биология. Радиоэкология. 2002. Т. 42, № 3. С. 308–314.
9. Лукьянова С. Н. Электромагнитное излучение нетепловой интенсивности и короткой экспозиции как подпороговый раздражитель для центральной нервной системы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2013. Т. 53, № 6. С. 625–633.
10. Лукьянова С. Н. Электромагнитное поле СВЧ-диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М. : ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России, 2015. 201 с.
11. 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.
12. Муравейко А. В., Степанюк И. А., Муравейко В. М., Фролова Н. С. Эффекты влияния электромагнитных полей в области "шумановских резонансов" на активность гидробионтов // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 4. С. 764–770.
13. Павлова Л. Н., Дубовик Б. В., Жаворонков Л. П., Глушакова В. С. Экспериментальное обоснование возможных механизмов влияния электромагнитных полей (ЭМП) низкой интенсивности на поведение животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52, № 4. С. 388–393.
14. Павлова Л. Н., Дубовик Б. В., Жаворонков Л. П., Лушников Г. А. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМИ СВЧ низкой интенсивности на крыс Вистар с высокой организацией адаптивного поведения // Радиация и риск. 2016. Том 25, № 2. С. 67–78.
15. Павлова Л. Н., Жаворонков Л. П., Дубовик Б. В., Глушакова В. С. [и др.]. Экспериментальная оценка реакций ЦНС на воздействие импульсных ЭМИ низкой интенсивности // Радиация и риск. 2010. Т. 19, № 3. С. 104–119.
16. Павлова Л. Н., Жаворонков Л. П., Дубовик Б. В. Влияние низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного электромагнитного поля на когнитивные функции мозга крыс // Радиация и риск. 2013. Т. 22, № 2. С. 91–100.
17. Устройство для исследования влияния искусственного электромагнитного поля на водные биологические объекты : пат. № 166414 Рос. Федерация / Е. Д. Терещенко, В. Ф. Григорьев № 2016125093/28 ; заявл. 22.06.2016 ; опубл. 27.11.2016, Бюл. № 33.
18. Хабарова О. В. Биоэффективные частоты и их связь с собственными частотами живых организмов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2002. № 5. С. 56–66.
19. Холодов Ю. А. Влияние электромагнитных и магнитных полей на центральную нервную систему. М. : Наука, 1966. 283 с.
20. Холодов Ю. А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М. : Наука, 1975. 207 с.
21. Эльгард А. Л., Холодов Ю. А. Влияние постоянного магнитного поля на двигательную активность птиц // Журнал общей биологии. 1964. Т. 25, № 3. С. 224–237.
22. Яковлев А. П., Григорьев В. Ф. Изменение двигательной активности серого тюленя при воздействии на него магнитного поля частотой 2, 18 и 36 Гц в течение 1–4 часов // Вестник МГТУ. 2017. Т. 20, № 2. С. 503–510. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-2-503-510>.
23. Яковлев А. П., Ишкулов Д. Г., Зайцев А. А., Трошичев А. Р. [и др.]. Влияние искусственных электромагнитных полей на частотах шумановского резонанса на двигательную активность серого тюленя // Наука юга России. 2018. Т. 14, № 4. С. 82–91. DOI: [10.7868/S25000640180410](https://doi.org/10.7868/S25000640180410).
24. Kholodov I. A. Nonspecific reaction of the nervous system to non-ionizing radiation // Радиационная биология. Радиоэкология. 1998. Т. 38, № 1. С. 121–125.
25. Walker M. M., Dennis T. E., Kirschvink J. L. The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals // Current Opinion in Neurobiology. 2002. Vol. 12, Iss. 6. P. 735–744. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00389-6](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00389-6).
26. Zapka M., Heyers D., Hein C. M., Engels S. et al. Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird // Nature. 2009. Vol. 461, Iss. 7268. P. 1274–1277. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08528>.

References

1. Bingy, V. N. 2012. Two types of magnetic biological effects: Individual and group. *Biophysics*, 57(2), pp. 338–345. (In Russ.)
2. Bingy, V. N. 2016. Primary physical mechanism of biological effects of weak magnetic fields. *Biophysics*, 61(1), pp. 201–208. (In Russ.)

3. Bingy, V. N. 2002. Magnetobiology: Experiments and models. 2 ed. Moscow, MILTA. (In Russ.)
4. Magnetite biomineralization and magnetoreception in organisms. A new biomagnetism. 1989. 2 v. J. Kirschvink et al. (eds.), Moscow, Mir, Vol. 1. (In Russ.)
5. Breus, T. K., Bingy, V. N., Petrukovich, A. A. 2016. Magnetic factor of solar-terrestrial connections and its influence on the person: Physical problems and prospects. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 186(5), pp. 568–576. DOI: 10.3367/UFNr.2015.12.037693. (In Russ.)
6. Eskov, E. K., Toboev, V. A. 2008. Impact of artificially generated electromagnetic fields on biological objects. *Bulletin of the Chuvash University*, 2, pp. 28–36. (In Russ.)
7. Zhavoronkov, L. P., Dubovik, B. V., Pavlova, L. N., Kolganova, O. I. et al. 2011. Influence of broadband pulse-modulated EMF of low intensity on the general excitability of the Central nervous system. *Radiation and Risk*, 20(2), pp. 64–74. (In Russ.)
8. Lukyanova, S. N. 2002. Phenomenology and genesis of changes in the total bioelectric activity of the brain to electromagnetic radiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 42(3), pp. 308–314. (In Russ.)
9. Lukyanova, S. N. 2013. Electromagnetic radiation of non-thermal intensity and short exposure as a subthreshold stimulus for the Central nervous system. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 53(6), pp. 625–633. (In Russ.)
10. Lukyanova, S. N. 2015. The electromagnetic field of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant to the Central nervous system. Moscow, Federal Medical Biophysical Center named after A. I. Burnazyan. (In Russ.)
11. Matishov, G. G., Voinov, V. B., Verbitsky, E. V., Mikhailyuk, A. L. et al. 2010. Marine mammals in bioengineering systems dual-use: A methodological guide. Murmansk, MMBI KNSt RAN. (In Russ.)
12. Muraveiko, A. V., Stepanyuk, I. A., Morawaka, V. M., Frolova N. S. 2013. The effects of electromagnetic fields in the "Schumann resonance" on the activity of aquatic organisms. *Vestnik of MSTU*, 16(4), pp. 764–770. (In Russ.)
13. Pavlova, L. N., Dubovik, B. V., Zhavoronkov, L. P., Glushakova, V. S. Experimental study of possible mechanisms of influencing electromagnetic fields (EMF) of low intensity on animal behavior. 2012. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 52(4), pp. 388–393. (In Russ.)
14. Pavlova, L. N., Dubovik, B. V., Zhavoronkov, L. P., Lushnikova, G. A. 2016. Influence of broadband pulse-modulated EMR microwave of low intensity on Wistar rats with high organization of adaptive behavior. *Radiation and Risk*, 25(2), pp. 67–78. (In Russ.)
15. Pavlova, L. N., Zhavoronkov, L. P., Dubovik, B. V. Influence of low-intensity broadband pulse-modulated electromagnetic field on cognitive functions of rat brain. 2013. *Radiation and Risk*, 22(2), pp. 91–100. (In Russ.)
16. Pavlova, L. N., Zhavoronkov, L. P., Dubovik, B. V., Glushakova, V. S. et al. 2010. Experimental evaluation of CNS reactions to the impact of pulsed EMR of low intensity. *Radiation and Risk*, 19(3), pp. 104–119. (In Russ.)
17. Tereshchenko, E. D., Grigoriev, V. F. Polar Geophysical Institute. 2016. Device for research of influence of an artificial electromagnetic field on water biological objects, Russian Federation, Pat. 166414. (In Russ.)
18. Khabarova, O. V. 2002. Bioeffective frequencies and their connection with natural frequencies of living organisms. *Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika*, 5, pp. 56–66. (In Russ.)
19. Kholodov, Yu. A. 1966. Influence of electromagnetic and magnetic fields on the Central nervous system. Moscow, Nauka. (In Russ.)
20. Kholodov, Yu. A. 1975. Reactions of nervous system on electromagnetic fields. Moscow, Nauka. (In Russ.)
21. Elgard, A. L., Kholodov, Yu. A. 1964. Influence of constant magnetic field on motor activity of birds. *Zhurnal obshchei biologii*, 25(3), pp. 224–237. (In Russ.)
22. Yakovlev, A. P., Grigoriev, V. F. 2017. Changes in the motor activity of the gray seal under the influence of the magnetic field at the frequency of 2, 18 and 36 Hz for 1–4 hours. *Vestnik of MSTU*, 20(2), pp. 503–510. DOI: <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2017-20-2-503-510>. (In Russ.)
23. Yakovlev, A. P., Ishkulov, D. G., Zaitsev, A. A., Troshichev, A. R. et al. 2018. Influence of artificial electromagnetic fields at the frequencies of the Schumann resonance on the motor activity of the gray seal. *Science in the South of Russia*, 14(4), pp. 82–91. DOI: 10.7868/S25000640180410. (In Russ.)
24. Kholodov, I. A. 1998. Nonspecific reaction of the nervous system to non-ionizing radiation // *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 38(1), pp. 121–125.
25. Walker, M. M., Dennis, T. E., Kirschvink, J. L. 2002. The magnetic sense and its use in long-distance navigation by animals. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(6), pp. 735–744. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(02\)00389-6](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(02)00389-6).
26. Zapka, M., Heyers, D., Hein, C. M., Engels, S. et al. 2009. Visual but not trigeminal mediation of magnetic compass information in a migratory bird. *Nature*, 461(7268), pp. 1274–1277. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature08528>.

Сведения об авторах

Яковлев Андрей Петрович – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, мл. науч. сотрудник;
e-mail: xloroplast@mail.ru; mmbi@mmbi.info, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Andrei A. Yakovlev – 17 Vladimirskaia Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS, Junior Researcher; e-mail: mmbi@mmbi.info, xloroplast@mail.ru,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1720-0562>

Зайцев Александр Алексеевич – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН;
e-mail: yanmos@yandex.ru; mmbi@mmbi.info, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Alezander A. Zaytsev – 17 Vladimirskaia Str., Murmansk, Russia, 183010;
Murmansk Marine Biological Institute KSC RAS;
e-mail: yanmos@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8056-636X>

Ишкулов Дмитрий Геннадьевич – ул. Владимирская, 17, г. Мурманск, Россия, 183010;
Мурманский морской биологический институт КНЦ РАН, канд. биол. наук;
e-mail: ishkulov@mmbi.info; mmbi@mmbi.info, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1508-1117>

Dmitry G. Ishkulov – 17 Vladimirskaia Str., Murmansk, Russia, 183032;
Murmansk Marine Biological Institute, Cand. Sc. (Biology);
e-mail: ishkulov@mmbi.info, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1508-1117>

Григорьев Валерий Федосеевич – ул. Халтурина, 15, г. Мурманск, Россия, 183010;
Полярный геофизический институт; e-mail: valgri@pgi.ru; general@pgi.ru

Valery F. Grigoriev – 15 Khalturina Str., Murmansk, Russia, 183010;
Polar Geophysical Institute; e-mail: general@pgi.ru, valgri@pgi.ru