

Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы

Н. В. Ширяева^{✉1}, А. И. Вайдо¹, М. Б. Павлова¹, С. В. Сурма¹, Б. Ф. Щеголев¹

¹ Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 199034, Россия, Санкт-Петербург, наб. Макарова, д. 6

Сведения об авторах

Наталья Викторовна Ширяева,
SPIN-код: 6291-7682,
Scopus AuthorID: 6701910737,
ORCID: 0000-0001-9940-9575,
e-mail: shiryayeva@infran.ru

Александр Иванович Вайдо,
SPIN-код: 1323-5153,
Scopus AuthorID: 7004491278,
ORCID: 0000-0002-6209-9902,
e-mail: vaidoai@infran.ru

Марина Борисовна Павлова,
SPIN-код: 6457-5630, Scopus
AuthorID: 55159027700,
ORCID: 0000-0002-3674-906X,
e-mail: pavlova.mb@infran.ru

Сергей Викторович Сурма,
SPIN-код: 7059-0259,
Scopus AuthorID: 36054909800,
ORCID: 0000-0003-4505-0995,
e-mail: svb-infran@yandex.ru

Борис Федорович Щеголев,
SPIN-код: 1239-3324,
Scopus AuthorID: 6701534523,
ORCID: 0000-0001-5500-2837,
e-mail: shcheg@mail.ru

Для цитирования:

Ширяева, Н. В., Вайдо, А. И., Павлова, М. Б., Сурма, С. В., Щеголев, Б. Ф. (2020) Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы.

Интегративная физиология, т. 1, № 2, с. 123–132.

DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-2-123-132

Получена 27 июня 2019;
прошла рецензирование
8 июля 2019;
принята 24 июля 2019.

Аннотация. В последние годы активно исследуются механизмы воздействия на биологические объекты техногенных источников электромагнитных излучений и изменений естественного электромагнитного фона окружающей среды (ослабление, усиление). Важными индикаторами неблагоприятного влияния неионизирующих электромагнитных излучений являются изменения элементов врожденного поведения и когнитивных функций. При этом роль наследственно обусловленных характеристик нервной системы в определении чувствительности/устойчивости к колебаниям электромагнитных полей практически не изучалась. Цель работы заключалась в исследовании влияния излучения УВЧ-диапазона стандартного Wi-Fi-роутера и ослабленных экранированием внешних магнитных и электрических полей на врожденное поведение, отражающее ориентировочно-исследовательскую активность и эмоциональность животных в тесте «открытое поле», и когнитивные функции (сохранение условного рефлекса пассивного избегания) у самцов крыс двух селективных линий ВП и НП (с высоким и низким порогами возбудимости нервной системы, низковозбудимые и высоковозбудимые, соответственно), а также крыс контрольной линии Вистар. Показано негативное влияние на врожденное поведение и память крыс двух линий с различными порогами возбудимости нервной системы ослабленных внешних электрических и магнитных полей, а также ЭМИ УВЧ-диапазона. Крысы с высокой возбудимостью нервной системы оказались более чувствительными к изменениям магнитного и электрического фона, электромагнитным излучениям по сравнению с низковозбудимыми животными.

Ключевые слова: электромагнитные излучения, слабые магнитные поля, поведение, обучение, возбудимость, крысы.

Финансирование: Работа проводилась в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий на 2013–2020 годы (ГП-14, раздел 65).

Права: © Авторы (2020). Опубликовано Российским государственным педагогическим университетом им. А. И. Герцена. Открытый доступ на условиях лицензии CC BY-NC 4.0.

Electromagnetic radiation impact on the orienting-exploratory activity and cognitive functions of rat strains with contrasting excitability of the nervous system

N. V. Shiryayeva^{✉1}, A. I. Vaido¹, M. B. Pavlova¹, S. V. Surma¹, B. F. Shchegolev¹

¹ Pavlov Institute of Physiology, Russian Academy of Sciences, 6 Makarova Emb., Saint Petersburg 199034, Russia

Authors

Natalya V. Shiryayeva,
SPIN: 6291-7682,
Scopus AuthorID: 6701910737,
ORCID: 0000-0001-9940-9575,
e-mail: shiryayeva@infran.ru

Alexander I. Vaido,
SPIN: 1323-5153,
Scopus AuthorID: 7004491278,
ORCID: 0000-0002-6209-9902,
e-mail: vaidoai@infran.ru

Marina B. Pavlova,
SPIN: 6457-5630,
Scopus AuthorID: 55159027700,
ORCID: 0000-0002-3674-906X,
e-mail: pavlova.mb@infran.ru

Sergey V. Surma,
SPIN: 7059-0259,
Scopus AuthorID: 36054909800,
ORCID: 0000-0003-4505-0995,
e-mail: sv-s-infran@yandex.ru

Boris F. Shchegolev,
SPIN: 1239-3324,
Scopus AuthorID: 6701534523,
ORCID: 0000-0001-5500-2837,
e-mail: shcheg@mail.ru

For citation: Shiryayeva, N. V., Vaido, A. I., Pavlova, M. B., Surma, S. V., Shchegolev, B. F. (2020) Electromagnetic radiation impact on the orienting-exploratory activity and cognitive functions of rat strains with contrasting excitability of the nervous system. *Integrative Physiology*, vol. 1, no. 2, pp. 123–132. DOI: 10.33910/2687-1270-2020-1-2-123-132

Received 27 June 2019;
reviewed 8 July 2019;
accepted 24 July 2019.

Abstract. In recent years, the mechanisms of influence that technogenic sources of electromagnetic radiation and the change in the natural electromagnetic field have on biological objects have been actively investigated. Nevertheless, the role of ancestral conditional characteristics of the nervous system in susceptibility towards and resilience against electromagnetic field oscillations has been virtually ignored. The objective of our research is to investigate the impact of the UHF band radiation emitted by a standard Wi-Fi router and the impact of external magnetic and electric fields weakened by shielding on animals' innate behaviour which reflects orientational and exploratory activity and emotional response in an Open Field Test, and also on the cognitive functions (retention of the conditioned response of passive avoidance) of male rats from two selected strains: HT and LT — with high and low thresholds of nervous system excitability, and control Wistar rats. The outcomes of the study confirm the negative impact of weak external electric and magnetic fields, as well as EMR of the UHF band, on innate behaviour and memory in rats regardless of the selected strain, although HT rats were more sensitive to changes in magnetic and electric fields and electromagnetic radiation in comparison with LT rats.

Keywords: electromagnetic radiation, weak electromagnetic fields, behaviour, learning, excitability, rats.

Funding: This research is part of the Fundamental Scientific Research Program for State Academies for the years 2013–2020 (GP-14, Section 65).

Copyright: © The Authors (2020).
Published by Herzen State Pedagogical University of Russia.
Open access under
CC BY-NC License 4.0.

Техногенные источники электромагнитных излучений (ЭМИ) и изменение естественного электромагнитного фона окружающей среды (ослабление, усиление) оказывают существенное влияние на функции организма человека и животных на различных структурных уровнях, что может представлять угрозу для здоровья и экологической безопасности живых организмов. В последние годы особенно активно изучаются механизмы воздействия на биологические объекты высокочастотных ЭМИ и ослабленных экранированием магнитных полей (МП) (Karthick et al. 2017; Lai 2005; Buchachenko 2014).

Чрезвычайно чувствительной к влиянию ЭМИ и ослабленных магнитных полей является нервная система. Их действие на нервную систему характеризуется изменением врожденных элементов поведения, условно-рефлекторной деятельности, физиологических процессов (Schneider et al. 2014; Spivak et al. 2016; Никитина и др. 2017), что является важным индикатором неблагоприятного влияния естественных и техногенных модификаций ЭМИ. Реакция организма на эти воздействия может иметь индивидуальный характер и быть связанной с функциональным состоянием нервной системы. Роль наследственно обусловленных характеристик нервной системы в определении чувствительности/устойчивости к колебаниям электромагнитных полей практически не изучалась (Дюжикова и др. 2018; 2019).

Цель настоящей работы — изучение влияния излучения УВЧ-диапазона стандартного Wi-Fi-роутера и ослабленных экранированием внешних магнитных и электрических полей на врожденное поведение, отражающее ориентировочно-исследовательскую активность и эмоциональность животных, и когнитивные функции у самцов крыс двух селективных линий ВП и НП (с высоким и низким порогами возбудимости нервной системы, низковозбудимые и высоковозбудимые соответственно), а также крыс контрольной линии Вистар.

Материал и методы

Работу проводили с использованием самцов крыс в возрасте 5 месяцев стандартной линии Вистар и линий ВП и НП, селективных в лаборатории генетики высшей нервной деятельности (Вайдо 2000; Вайдо и др. 2018) и входящих в биосборку ФГБУН Института физиологии им. И. П. Павлова РАН (№ ГЗ 0134-2018-0003). Самцов содержали группами по 6–8 особей в стандартных клетках на стандартном пищевом рационе в условиях лабораторного вивария.

В работе использовали Wi-Fi-роутер (беспроводной маршрутизатор LinkSys E1200-EE/RU) со следующими техническими характеристиками: частота беспроводной связи 2,4 ГГц, 2 внутренние антенны с коэффициентом усиления 4 дБн, выходная мощность 16 дБм, среднее расстояние до животных — 40 см.

Для создания условий ослабления магнитного поля Земли (далее — ОМП) использовали экранирующую камеру, выполненную из немагнитного материала (картона) и покрытую сверху несколькими слоями аморфного магнитомягкого материала АМАГ-172, что обеспечило 40-кратное уменьшение величины индукции магнитного поля Земли внутри камеры (с 48 мкТл до 1,2 мкТл) (Сурма и др. 2012). Имитирующая камера (без ослабления магнитного поля Земли, величина индукции МП — 48 мкТл, далее — БОМП) была изготовлена из картона, не имела экранирующего покрытия и была покрыта черным полиэтиленом. Обе камеры выполнены в виде цилиндров диаметром 60 см и длиной 140 см, закрытых с одного торца и открытых с другого так, чтобы в глубину камеры легко помещалась клетка с крысами. Для определения величины индукции магнитного поля за пределами и внутри экспериментальных камер были проведены измерения с использованием магнитометров Fluxmaster (StefanMayerInstruments, Dinslaken, Germany) (1 нТл — 200 мкТл, с разрешением 1 нТл) и НВ0302.1А (St. Petersburg, Russia) (0,1 мкТл — 100 мкТл, с разрешением 0,1 мкТл).

Для защиты от внешних низкочастотных электрических полей в экспериментах использовали клетку Фарадея, представляющую собой контейнер размером 600×750×600 мм со съемной крышкой, изготовленный из нескольких слоев металлической сетки, в которую помещали стандартную клетку с животными. Под верхней крышкой размещали дополнительную полку, в центре которой располагали Wi-Fi-роутер (Дюжикова и др. 2018).

Влияние на поведение крыс УВЧ-излучения роутера изучали в условиях экспозиции животных в камере, экранирующей магнитное поле, и в клетке Фарадея.

Для изучения влияния ЭМИ роутера в условиях ослабления внешнего магнитного поля (ОМП) либо без дополнительных ограничивающих воздействий (БОМП) «домашнюю» клетку с животными помещали в экранирующую камеру с роутером, расположенном на поддоне в центре верхней крышки клетки (группа ОМП+Роутер). Альтернативную группу крыс помещали в имитирующую камеру на то же время с роутером (группа БОМП+Роутер). Экспериментальные группы были подвергнуты воздействиям на протяжении 12 часов (с 22:00 до 10:00). Интактным контролем (далее — контроль1) служили животные, содержащиеся в виварии и не подвергавшиеся воздействиям.

Оценку поведения животных в тесте «открытое поле» проводили через час после окончания экспозиции животных в камере.

Используемая установка «открытое поле» представляла собой круг диаметром 160 см, ограниченный бортом высотой 35 см. Пол круга разделен на квадраты со стороной 20 см. Над центром поля на высоте 60 см подвешивалась лампа 500 Вт с зеркальным отражателем, обеспечивающим освещенность на уровне пола от 2000 Люкс в центре до 1500 Люкс по краям. При проведении тестирования крысу помещали в центральный квадрат круга и в течение 5 минут наблюдали за ее поведением. Регистрировали следующие параметры поведения: латентный период выхода из центра поля, число пересеченных квадратов (горизонтальная двигательная активность), подъем на задние лапы (число стоек) (вертикальная двигательная активность), оценивали количество актов груминга, количество поворотов налево и направо, количество кручений, количество болюсов (эмоциональность), количество актов фризинга (реакция страха).

Для изучения влияния ЭМИ Wi-Fi-роутера на когнитивные функции крыс оценивали со-

хранение условного рефлекса пассивного избегания (УРПИ) после 24-часовой экспозиции животных с роутером в клетке Фарадея с размещенной в ней стандартной клеткой с животными. В качестве контрольных использовали интактных животных каждой из линий (контроль1) и животных, помещенных в клетку Фарадея без дополнительных воздействий (контроль2).

Выработку условного рефлекса пассивного избегания (УРПИ) с однократным отрицательным болевым подкреплением производили с использованием установки, состоящей из двух камер, светлой и темной, в которой освещение отсутствовало. Как известно, в норме крысы проводят большую часть времени в темном отсеке, что связано с инстинктивным стремлением животных находиться в темном и тесном пространстве — норке (норковый рефлекс). Метод основан на выработке у крыс условной реакции пассивного избегания темной камеры в ответ на безусловный электрокожный болевой раздражитель. Крысу высаживали в центр светлой камеры, хвостом к отверстию в темную камеру. Животному давали 3 минуты для обследования; в течение этого времени оно находило отверстие в темную камеру и заходило в нее. В темной камере животное получало электрокожное болевое раздражение силой 1 мА длительностью 1 мин. На этом выработка рефлекса завершалась. Если животное в течение 3 минут не заходило в темную камеру, оно исключалось из дальнейшего эксперимента.

Через 1 час после выработки УРПИ крыс соответствующих групп, за исключением интактного контроля1, помещали на сутки в заданные экспериментальные условия. Проверку сохранения УРПИ осуществляли сразу после окончания экспозиции животных в камерах Фарадея с роутером.

Регистрировали процент животных, не заходивших в темный отсек.

Статистическая обработка

Для представления результатов вычисляли средние значения и медианы. На рисунках представлены медианы. Определение достоверности различий между вариантами проводили с помощью критерия Манна — Уитни, ANOVA, а также критерия достоверности разности долей (Плохинский 1970). Использовали программное обеспечение Statgraphics Centurion XV11 и Statistica 6.0.

Результаты

Результаты оценки разных компонентов ориентировочно-исследовательского поведения и эмоциональности в тесте «открытое поле» у крыс двух линий ВП и НП, интактных и после экспозиции в экранирующей внешней магнитное поле и имитирующей камер, без дополнительных воздействий, и в сочетании с работающим Wi-Fi-роутером представлены на рисунке 1.

У интактных высоковозбудимых крыс линии НП число стоек выше (рис. 1–3), а количество актов фризинга ниже (рис. 1–6) по сравнению с низковозбудимой линией ВП.

Экспозиция линейных животных в экранирующей и имитирующей камерах в течение 12 часов, независимо от дополнительных экспериментальных условий, приводит у крыс линии ВП к снижению актов фризинга (рис. 1–6) и увеличению количества поворотов (рис. 1–7); у НП — к снижению латентного периода первого движения (рис. 1–1) и количества болюсов (рис. 1–4), увеличению актов груминга (рис. 1–5) по сравнению с интактным контролем.

ОМП вызывает изменения — увеличение актов фризинга, а также левых и правых поворотов (рис. 1–7 и 1–8) — только у крыс линии НП (рис. 1–6) по сравнению с соответствующими группами БОМП и интактным контролем.

ЭМИ роутера и в условиях ослабленного экранированием внешнего магнитного поля, и без него приводит у крыс линии ВП к увеличению правых поворотов (рис. 1–8), тогда как у линии НП — к увеличению актов фризинга (рис. 1–6) и кручений (рис. 1–9) по сравнению с группами ОМП и БОМП соответственно, а также с интактным контролем.

При этом влияние роутера на фоне ОМП приводит к избирательному снижению количества болюсов у крыс линии ВП (рис. 1–4) и числа пересеченных квадратов у крыс линии НП (рис. 1–2).

Результаты оценки сохранения УРПИ после 24-часового воздействия УВЧ ЭМИ роутера в условиях клетки Фарадея по сравнению с собственно клеткой Фарадея и у интактного контроля линии Вистар представлены на рисунке 2, а соответствующие результаты у крыс линий ВП и НП — на рисунке 3.

Действие УВЧ ЭМИ роутера привело к нарушению сохранения УРПИ у крыс линии Вистар в 2 раза по сравнению с интактным контролем и в 3 раза по сравнению с активным контролем — клеткой Фарадея (рис. 2).

Экспозиция высоковозбудимых крыс линии НП в клетке Фарадея и без дополнительных

воздействий, и при действии роутера привела к значительному снижению уровня сохранения УРПИ по сравнению с интактным контролем (рис. 3). При этом в условиях действия роутера проявились более чем 2-кратные различия с линией ВП в эффективности сохранения УРПИ.

У животных линии ВП не обнаружено различий в сохранении рефлекса между всеми экспериментальными группами (рис. 3).

Обсуждение

Проведенные эксперименты свидетельствуют в пользу влияния всех исследуемых факторов (УВЧ ЭМИ роутера, ослабление внешнего магнитного поля, экспериментальные условия) на поведение крыс в тесте «открытое поле». Характер реакции зависит от наследственно обусловленной возбудимости нервной системы животных и затрагивает разные компоненты поведения.

Влияние ЭМИ роутера в большей степени сказалось на поведении высоковозбудимых крыс линии НП и привело к усилению реакции страха в новой обстановке и повышению хаотичности движений.

Ослабление экранированием внешнего магнитного поля повлияло только на крыс линии НП и вызвало также усиление реакции страха и увеличение количества поворотов, свидетельствующих о повышении общего беспокойства.

Однако и само пребывание животных в ограниченном пространстве экспериментальных цилиндров привело к изменениям поведения крыс обеих линий, что проявилось у линии ВП в снижении реакции страха (фризинга) и увеличении поворотов, тогда как у линии НП — в усилении тревожности и снижении эмоциональности.

Оценка поведения в тесте «открытое поле» у интактных крыс линий ВП и НП позволила также подтвердить наличие межлинейных различий в уровне двигательной активности и реакции страха, связанных с генетически детерминированными особенностями возбудимости нервной системы (Вайдо 2000; 2018).

Полученные результаты позволили заключить, что нарушение сохранения памяти при обучении УРПИ вследствие ослабления электрического поля в клетке Фарадея и в сочетании с дополнительным влиянием ЭМИ роутера более выражено при наследственно обусловленной высокой возбудимости нервной системы у крыс линии НП. Собственно УВЧ ЭМИ роутера значительно ослабляло когнитивные функции только у крыс линии Вистар.

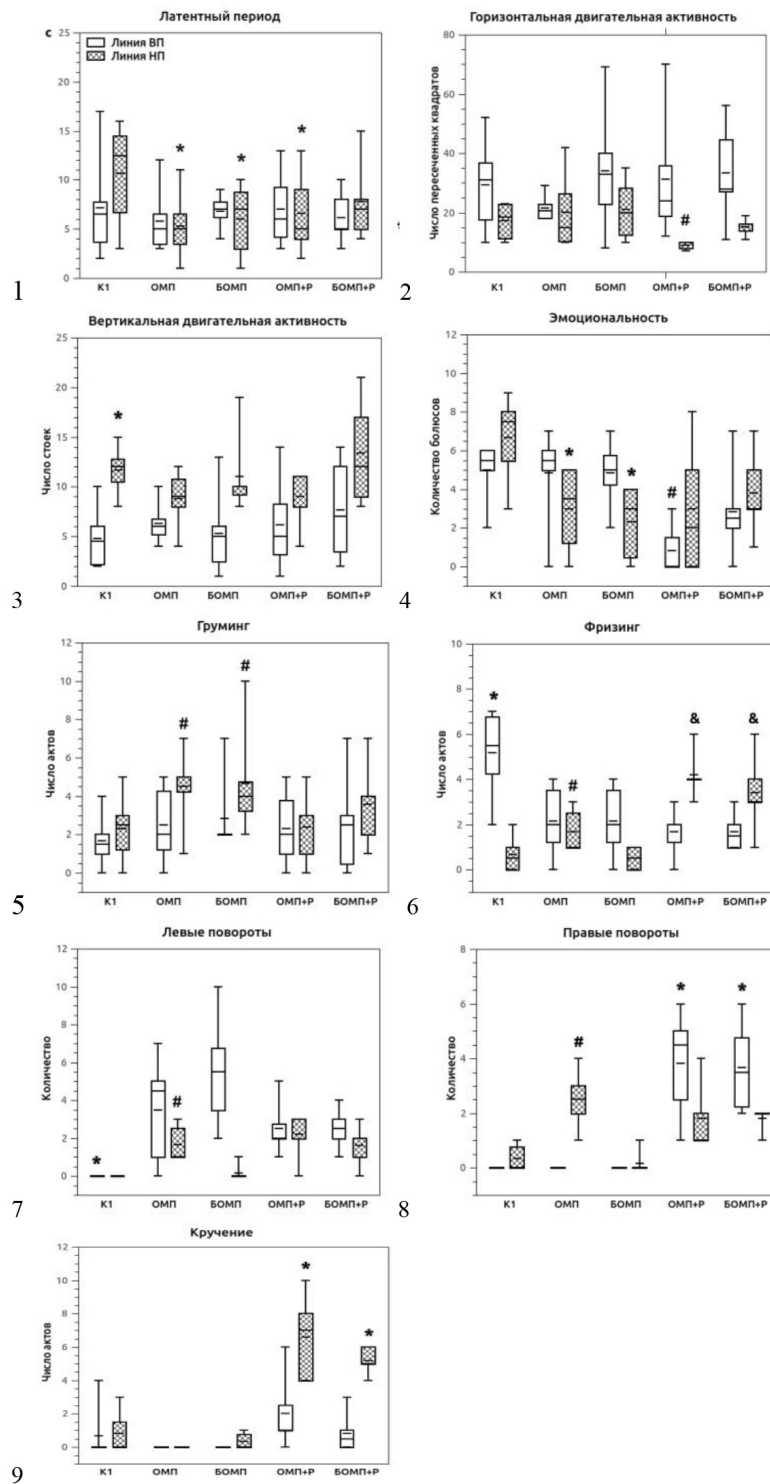


Рис. 1. Результаты оценки разных компонентов поведения в тесте «открытое поле» у самцов крыс линий ВП и НП после экспозиции в экранирующей (ОМП) и имитирующей (БОМП) камерах, в тех же условиях с роутером (ОМП+Роутер, БОМП+Роутер, соответственно), контроль1 — интактные животные.

Обозначения:

1 — Латентный период; * — различия с контролем1 линии НП достоверны ($P < 0,05$).

2 — Горизонтальная двигательная активность (число пересеченных квадратов); # — различия с остальными группами линии НП достоверны ($P < 0,05$).

3 — Вертикальная двигательная активность (число стоек) в тесте; * — различия с группой контроль1 линии ВП достоверны ($P < 0,05$).

4 — Эмоциональность (количество болюсов); * — различия с группой контроль1 соответствующей линии достоверны ($P < 0,05$); # — различия с остальными группами линии ВП достоверны ($P < 0,05$).

5 — Число актов груминга; # — различия с группой контроль1 линии НП достоверны ($P < 0,05$).

6 — Число актов фризинга; * — различия с контролем1 линии НП и со всеми остальными группами линии ВП достоверны ($P < 0,05$); # — различия с группой БОМП линии НП достоверны ($P < 0,05$); & — различия с соответствующими группами ОМП и БОМП линии НП достоверны ($P < 0,05$).

7 — Число левых поворотов; * — различия со всеми остальными группами линии ВП достоверны ($P < 0,05$); # — различия с группой БОМП линии НП достоверны ($P < 0,05$).

8 — Число правых поворотов; * — различия с группами контроль1, ОМП, БОМП линии ВП достоверны ($P < 0,05$); # — различия с группой БОМП линии НП достоверны ($P < 0,05$).

9 — Число кручений; * — различия с группами контроль1, ОМП, БОМП линии НП достоверны ($P < 0,05$)

Fig. 1. Evaluation results for different behavioral components in the Open Field Test in HT and LT strain male rats after the exposure in a Faraday cage and a simulation cage; under the same conditions with a router (Faraday cage + router, simulation cage + router, respectively), Control 1 — intact animals.

1 — Latent period; * — difference between LT strain and Control 1 is significant $p < 0.05$.

2 — Horizontal mobility (number of squares crossed); # — difference from other LT strain groups is significant $p < 0.05$.

3 — Vertical mobility (number of upright stands) during the test; * — difference between HT strain and Control 1 is significant $p < 0.05$.

4 — Excitement (number of boli); * — difference between the corresponding strain and Control 1 is significant $p < 0.05$; # — difference from other HT strain groups is significant $p < 0.05$.

5 — Number of grooming acts; # — difference between LT strain and Control 1 is significant $p < 0.05$.

6 — Number of freezing acts; * — difference between LT strain Control 1 and the other HT strains is significant $p < 0.05$; # — difference from simulation cage LT strain is significant $p < 0.05$; & — difference from corresponding LT strain groups is significant $p < 0.05$.

7 — Number of left turns; * — difference from other HT strain groups is significant $p < 0.05$; # — difference from simulation cage LT strain is significant $p < 0.05$.

8 — Number of right turns; * — difference between Control 1, Faraday cage and simulation cage HT strain groups is significant $p < 0.05$; # — difference from simulation cage LT strain is significant $p < 0.05$.

9 — Number of rotations; * — difference between Control 1, Faraday cage and simulation cage LT strain groups is significant $p < 0.05$

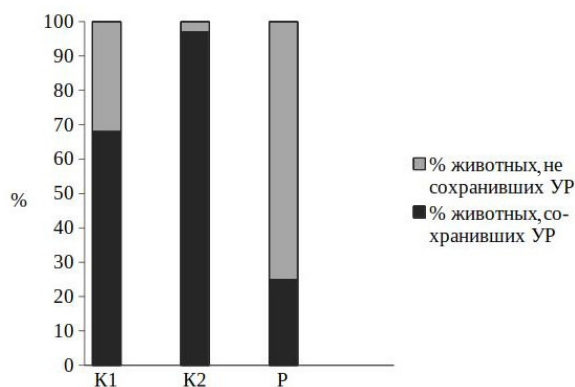


Рис. 2. Сохранение УРПИ после экспозиции крыс линии Вистар в клетке Фарадея без дополнительных воздействий (K2) и с роутером (P). K1 — интактные контрольные животные. * — различия со всеми остальными группами достоверно ($P < 0,05$)

Fig. 2. Retention of the conditioned reaction of passive avoidance after Wistar rats exposure in the Faraday cage without additional effects (K2) and with router (P). K1 — control group of intact animals.

* — difference from all groups is significant $p < 0.05$

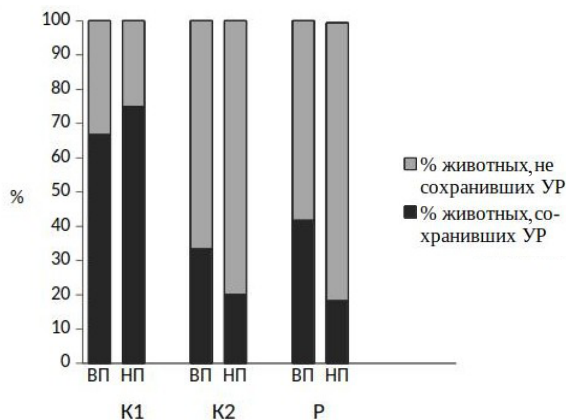


Рис. 3. Сохранение УРПИ после экспозиции крыс двух линий ВП и НП в клетке Фарадея без дополнительных воздействий (K2) и с роутером (P). K1 — интактные контрольные животные. Линиями обозначены достоверно различающиеся величины ($P < 0,05$)

Fig. 3. Retention of the conditioned reaction of passive avoidance after HT and LT rats exposure in the Faraday cage without additional effects (K2) and with router (P). K1 — control group of intact animals. Lines indicate the difference (significant $p < 0.05$)

У крыс с низкой возбудимостью нервной системы (линия ВП) используемые экспериментальные воздействия не вызвали статистически значимых изменений в способности к сохранению в памяти УРПИ.

Таким образом, в целом крысы с высокой возбудимостью нервной системы оказались более чувствительными к изменениям магнитного и электрического фона, электромагнитным излучениям по сравнению с низковозбудимыми животными.

Хромосомный аппарат высоковозбудимых крыс линии НП также более подвержен повреждающему действию высокочастотных ЭМИ по сравнению с линией ВП (Дюжикова и др. 2019).

Влияние переменного, но не статического электрического поля (35 кВ/м) на способность к обучению и пространственную память показано у мышей (Di et al. 2019). Воздействие высокочастотных электромагнитных полей на память зрелых самцов крыс продемонстрировано в тестах социальной дискриминации (Schneider et al. 2014). Показано, что ЭМИ сверхвысокой частоты вызывают у крыс линии Вистар метаболическое перепрограммирование митохондрий клеток головного мозга, что увеличивает скорость образования супероксидных радикалов и оксида азота, которые могут инициировать развитие нейродегенеративных заболеваний и рака (Burlaka et al. 2016).

Механизмы воздействия на организм ЭМИ и магнитных полей в настоящее время активно исследуются, ведутся многочисленные дискуссии в отношении возможных путей их влияния на организм, проявления магнитобиологических эффектов и их последствий (Karthick et al. 2017; Pall 2016; Terzi et al. 2016). Недавно группой американских и японских исследователей с ис-

пользованием метода ЭЭГ обнаружена способность человека ощущать изменения магнитного поля (выявлены изменения активности мозга в альфа-диапазоне при различной ориентации магнитного поля относительно испытуемого в клетке Фарадея) (Wang et al. 2019); тем не менее механизмы магниторецепции у человека пока неясны.

Наиболее обоснованной среди обсуждаемых гипотез представляется молекулярная концепция (Buchachenko 2014), построенная на значении ион-радикальной пары в качестве приемника магнитных полей и источника магнитных эффектов. Неспаренные электроны в них являются носителями спинового магнетизма, и именно они взаимодействуют с постоянными и переменными магнитными полями. Доказано участие таких пар в ферментативном синтезе основного энергоносителя живых систем — АТФ и репликативном синтезе ДНК при участии полимераз.

Заключение

Результаты настоящей работы подтверждают негативное влияние на врожденное поведение и память крыс ограничений внешнего электрического и магнитного полей, а также ЭМИ УВЧ-диапазона, указывают на необходимость учета типологических особенностей нервной системы при разработке средств защиты от негативного влияния ЭМИ и корректировки магнитобиологических эффектов различных источников излучения. Такой подход важен для понимания причин индивидуальной изменчивости в чувствительности к ЭМИ и определении на этой основе путей коррекции индуцированных ЭМИ патогенетических процессов у человека.

Литература

- Вайдо, А. И. (2000) *Физиолого-генетический анализ возбудимости нервной системы и поведения лабораторной крысы. Диссертация на соискание ученой степени доктора биологических наук*. СПб., Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН, 197 с.
- Вайдо, А. И., Ширяева, Н. В., Павлова, М. Б. и др. (2018) Селектированные линии крыс с высоким и низким порогом возбудимости: модель для изучения дезадаптивных состояний, зависимых от уровня возбудимости нервной системы. *Лабораторные животные для научных исследований*, № 3, с. 12–22. DOI: 10.29296/2618723X-2018-03-02
- Дюжикова, Н. А., Копыльцов, А. В., Коршунов, К. А. и др. (2018) Действие электромагнитного излучения высокой частоты и влияние резонаторов-преобразователей на частоту хромосомных aberrаций в клетках костного мозга самцов крыс линии Вистар. *Электромагнитные волны и электронные системы*, т. 23, № 1, с. 12–18.
- Дюжикова, Н. А., Вайдо, А. И., Даев, Е. В. и др. (2019) Влияние электромагнитного излучения УВЧ-диапазона на дестабилизацию генома клеток костного мозга у крыс линий с контрастной возбудимостью нервной системы. *Экологическая генетика*, т. 17, № 2, с. 83–92. DOI: 10.17816/ecogen17283-92

- Никитина, Е. А., Медведева, А. В., Герасименко, М. С. и др. (2017) Ослабленное магнитное поле Земли: влияние на транскрипционную активность генома, обучение и память у *Dr. melanogaster*. *Журнал высшей нервной деятельности им. И. П. Павлова*, т. 67, № 2, с. 246–256. DOI: 10.7868/S0044467717020101
- Плохинский, Н. А. (1970) *Биометрия*. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 367 с.
- Сурма, С. В., Кузнецов, П. А., Хрусталева, Р. С. и др. (2012) *Устройство для исследования влияния электромагнитных полей на биологические объекты*. Патент RU2454675C2. Дата регистрации 27.06.2012. Выдано Роспатентом.
- Buchachenko, A. L. (2014) Magnetic field-dependent molecular and chemical processes in biochemistry, genetics and medicine. *Russian Chemical Reviews*, vol. 83, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1070/RC2014v083n01ABEH004335
- Burlaka, A. P., Druzhyna, M. O., Vovk, A. V., Lukin, S. M. (2016) Disordered redox metabolism of brain cells in rats exposed to low doses of ionizing radiation or UHF electromagnetic radiation. *Experimental Oncology*, vol. 38, no. 4, pp. 238–241. PMID: 28230822.
- Di, G., Kim, H., Xu, Y. et al. (2019) A comparative study on influences of static electric field and power frequency electric field on cognition in mice. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 66, pp. 91–95. PMID: 30639900. DOI: 10.1016/j.etap.2019.01.001
- Karthick, T., Sengottuvelu, S., Haja Sherief, H., Duraisami, R. (2017) Review: Biological effects of magnetic fields on rodents. *Scholars Journal of Applied Medical Sciences*, vol. 5 (4E), pp. 1569–1580.
- Lai, H. (2005) Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields. In: Gary E. Wnek, Gary L. Bowlin (eds.). *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. Vol. 1. 2nd ed. New York; London: Informa Healthcare, pp. 254–261.
- Pall, M. L. (2016) Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 75, pt B, pp. 43–51. PMID: 26300312. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001
- Schneider, J., Stangassinger, M. (2014) Nonthermal effects of lifelong high-frequency electromagnetic field exposure on social memory performance in rats. *Behavioral Neuroscience*, vol. 128, no. 5, pp. 633–637. PMID: 24999587. DOI: 10.1037/a0037299
- Spivak, I. M., Kuranova, M. L., Mavropulo-Stolyarenko, G. R. et al. (2016) Cell response to extremely weak static magnetic fields. *Biophysics*, vol. 61, no. 3, pp. 435–439. DOI: 10.1134/S0006350916030180
- Terzi, M., Ozberk, B., Deniz, O. G., Kaplan, S. (2016) The role of electromagnetic fields in neurological disorders. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 75, pt B, pp. 77–84. PMID: 27083321. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2016.04.003
- Wang, C. X., Hilburn, I. A., Wu, D.-A. et al. (2019) Transduction of the geomagnetic field as evidenced from alpha-band activity in the human brain. *eNeuro*, vol. 6, no. 2, article e0483-18.2019. PMID: 31028046. DOI: 10.1523/eneuro.0483-18.2019

References

- Buchachenko, A. L. (2014) Magnetic field-dependent molecular and chemical processes in biochemistry, genetics and medicine. *Russian Chemical Reviews*, vol. 83, no. 1, pp. 1–12. DOI: 10.1070/RC2014v083n01ABEH004335 (In English)
- Burlaka, A. P., Druzhyna, M. O., Vovk, A. V., Lukin, S. M. (2016) Disordered redox metabolism of brain cells in rats exposed to low doses of ionizing radiation or UHF electromagnetic radiation. *Experimental Oncology*, vol. 38, no. 4, pp. 238–241. PMID: 28230822. (In English)
- Di, G., Kim, H., Xu, Y. et al. (2019) A comparative study on influences of static electric field and power frequency electric field on cognition in mice. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, vol. 66, pp. 91–95. PMID: 30639900. DOI: 10.1016/j.etap.2019.01.001 (In English)
- Dyuzhikova, N. A., Kopyltsov, A. V., Korshunov, K. A. et al. (2018) Dejstvie elektromagnitnogo izlucheniya vysokoj chastoty i vliyanie rezonatorov-preobrazovatelej na chastotu khromosomnykh aberratsij v kletkakh kostnogo mozga samtsov krysv linij Vistar [The effect of high-frequency electromagnetic radiation and the effect of resonator-convertors on the frequency of chromosomal aberrations in bone marrow cells of male Wistar rats]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy — Electromagnetic Waves and Electronic Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 12–18. (In Russian)
- Dyuzhikova, N. A., Vaido, A. I., Daev, E. V. et al. (2019) Vliyanie elektromagnitnogo izlucheniya UVCh-diapazona na destabilizatsiyu genoma kletok kostnogo mozga u krysv linij s kontrastnoj vzbudimost'yu nervnoj sistemy [Impact of electromagnetic UHF radiation on genome destabilization in bone marrow cell of rat strains with contrast nervous system excitability]. *Ekologicheskaya genetika — Ecological Genetics*, vol. 17, no. 2, pp. 83–92. DOI: 10.17816/ecogen17283-92 (In Russian)
- Karthick, T., Sengottuvelu, S., Haja Sherief, H., Duraisami, R. (2017) Review: Biological effects of magnetic fields on rodents. *Scholars Journal of Applied Medical Sciences*, vol. 5 (4E), pp. 1569–1580. (In English)
- Lai, H. (2005) Biological effects of radiofrequency electromagnetic fields. In: Gary E. Wnek, Gary L. Bowlin (eds.). *Encyclopedia of biomaterials and biomedical engineering*. Vol. 1. 2nd ed. New York; London: Informa Healthcare, pp. 254–261. (In English)

- Nikitina, E. A., Medvedeva, A. V., Gerasimenko, M. S. et al. (2017) Oslablennoe magnitnoe pole Zemli: vliyaniye na transkripsionnyuyu aktivnost' genoma, obuchenie i pamyat' u *Dr. melanogaster* [Weakened geomagnetic field: impact on transcriptional activity of the genome, learning and memory formation in *Dr. melanogaster*]. *Zhurnal visshej nervnoj deyatel'nosti — I. P. Pavlov Journal Of Higher Nervous Activity*, vol. 67, no. 2, pp. 246–256. DOI: 10.7868/S0044467717020101 (In Russian)
- Pall, M. L. (2016) Microwave frequency electromagnetic fields (EMFs) produce widespread neuropsychiatric effects including depression. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 75, pt B, pp. 43–51. PMID: 26300312. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2015.08.001 (In English)
- Plokhinskij, N. A. (1970) *Biometriya [Biometrics]*. 2nd ed. Moscow: Moscow State University Publ., 367 p. (In Russian)
- Schneider, J., Stangassinger, M. (2014) Nonthermal effects of lifelong high-frequency electromagnetic field exposure on social memory performance in rats. *Behavioral Neuroscience*, vol. 128, no. 5, pp. 633–637. PMID: 24999587. DOI: 10.1037/a0037299 (In English)
- Spivak, I. M., Kuranova, M. L., Mavropulo-Stolyarenko, G. R. et al. (2016) Cell response to extremely weak static magnetic fields. *Biophysics*, vol. 61, no. 3, pp. 435–439. DOI: 10.1134/S0006350916030180 (In English)
- Surma, S. V., Kuznecov, P. A., Hrustaleva, R. S. et al. (2012) *Ustrojstvo dlya issledovaniya vliyaniya elektromagnitnyh polej na biologicheskie ob'ekty [Device for the study of the influence of electromagnetic fields on biological objects]*. Patent RU2454675C2. Register date 27.06.2012. Granted by Rospatent. (In Russian)
- Terzi, M., Ozberk, B., Deniz, O. G., Kaplan, S. (2016) The role of electromagnetic fields in neurological disorders. *Journal of Chemical Neuroanatomy*, vol. 75, pt B, pp. 77–84. PMID: 27083321. DOI: 10.1016/j.jchemneu.2016.04.003 (In English)
- Vaido, A. I. (2000) *Fiziologo-geneticheskij analiz vzbudimosti nervnoj sistemy i povedeniya laboratornoj krysy [Physiological and genetic analysis of the excitability of the nervous system and the behavior of the laboratory rat]*. PhD dissertation (Biology). Saint Petersburg, Pavlov Institute of Physiology of the Russian Academy of Sciences, 197 p. (In Russian)
- Vaido, A. I., Shiryayeva, N. V., Pavlova, M. B. et al. (2018) Selektirovannye linii krysy s vysokim i nizkim porogom vzbudimosti: model' dlya izucheniya dezadaptivnykh sostoyanij zavisimyh ot urovnya vzbudimosti nervnoj sistemy [Selected rat strains HT, LT as a model for the study of dysadaptation states dependent on the level of excitability of the nervous system]. *Laboratornye zhivotnye dlya nauchnykh issledovanij — Laboratory Animals for Science*, vol. 3, pp. 12–22. DOI: 10.29296/2618723X-2018-03-02 (In Russian)
- Wang, C. X., Hilburn, I. A., Wu, D.-A. et al. (2019) Transduction of the geomagnetic field as evidenced from alpha-band activity in the human brain. *eNeuro*, vol. 6, no. 2, article e0483-18.2019. PMID: 31028046. DOI: 10.1523/eneuro.0483-18.2019 (In English)