

<https://doi.org/10.47183/mes.2026-501>

УДК 57.043:57.084.1



ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ С ЧАСТОТОЙ 28 КГЦ НА КОГНИТИВНЫЕ ФУНКЦИИ У МЫШЕЙ В ВОЗРАСТЕ 1,5 ГОДА

Е.Е. Пряхин, И.А. Шапошникова✉

Южно-Уральский федеральный научно-клинический центр медицинской биофизики Федерального медико-биологического агентства, Озерск, Россия

Введение. Влияние электромагнитных полей промежуточной частоты (300 Гц — 10 МГц), источниками которых являются бытовые устройства и промышленные установки, на когнитивные функции изучено недостаточно. Существующие данные носят противоречивый характер и получены преимущественно в экспериментах на молодых животных. В условиях быстрого глобального старения населения особую актуальность представляет экспериментальная оценка эффектов переменных магнитных полей на когнитивные функции пожилого организма.

Цель. Оценка влияния импульсного магнитного поля на когнитивные функции и двигательную активность у мышей при физиологическом старении.

Материалы и методы. Когнитивные функции и двигательную активность оценивали с помощью поведенческих тестов «Водный лабиринт Морриса» (ВЛМ) и «Открытое поле». Самцов и самок мышей неинбредного стока CFW в возрасте 18 мес. подвергали воздействию импульсного магнитного поля (ИМП) (28 кГц, 140 ± 15 мкТл в импульсе) по 5 мин в течение 5 сут до начала проведения поведенческих исследований и каждый день за 5 мин до тестирования в ВЛМ. Группу контроля составили животные, которых по такой же схеме подвергали ложному воздействию (ЛВ).

Результаты. Показано, что динамика обучения у мышей при воздействии ИМП выше, чем в контрольной группе. На 5-е сут тестирования длительность поиска и длина траектории поиска скрытой платформы были высокодостоверно на 30% меньше по сравнению с контрольной группой, а частота успешного поиска скрытой платформы увеличилась на 75%. На 6-е сут тестирования в ВЛМ в финальной попытке мыши, подвергшиеся воздействию магнитного поля, в три раза чаще пересекали место расположения скрытой платформы. В проведенном тесте «Открытое поле» не было выявлено статистически значимого влияния воздействия импульсного магнитного поля на двигательную активность мышей.

Выводы. Импульсное магнитное поле с частотой повторения импульсов 28 кГц и индукцией 140 ± 15 мкТл уменьшает у мышей естественный спад когнитивных функций, связанный с физиологическим старением. Полученные результаты требуют проведения дополнительных исследований для уточнения зависимости обнаруженных эффектов от параметров ИМП (частоты, модуляции, интенсивности воздействия). Выявленные эффекты позволяют предположить возможность применения ИМП для коррекции возрастных изменений когнитивных функций у человека.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле; обучаемость; когнитивная функция; двигательная активность; мыши; физиологическое старение; водный лабиринт Морриса; Открытое поле

Для цитирования: Пряхин Е.Е., Шапошникова И.А. Оценка влияния импульсного магнитного поля с частотой 28 кГц на когнитивные функции у мышей в возрасте 1,5 года. *Экстремальная биомедицина*. 2026. <https://doi.org/10.47183/mes.2026-501>

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания ФМБА России «Изучение влияния длительного радиационного воздействия в раннем постнатальном периоде на отдаленные поведенческие и морфофункциональные показатели центральной нервной системы в эксперименте» (№ 27.003.23.800, шифр «Система»).

Соответствие принципам этики. Исследование выполнено с соблюдением правил биоэтики, утвержденных решением Коллегии ЕЭК от 14.11.2023 № 33 «О Руководстве по работе с лабораторными (экспериментальными) животными при проведении доклинических (неклинических) исследований» и Европейской конвенцией о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других целей. Проведение исследований одобрено на заседании биоэтического комитета ФГБУН ЮУрФНЦК МБ ФМБА России (протокол № 1 от 03.04.2023).

Потенциальный конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование инструментов ИИ. Авторы заявляют, что при подготовке рукописи не использовали инструменты искусственного интеллекта ИИ.

✉ Шапошникова Ирина Александровна shaposhnikova@lenta.ru

Статья поступила: 06.04.2026 **После доработки:** 03.06.2026 **Принята к публикации:** 10.06.2026 **Online first:** 21.08.2026

EFFECTS OF A 28 kHz PULSED MAGNETIC FIELD ON COGNITIVE FUNCTION IN 18-MONTH-OLD MICE

Eugene E. Priakhin, Irina A. Shaposhnikova✉

Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics, Ozersk, Russia

Introduction. The cognitive effects of intermediate-frequency electromagnetic fields (300 Hz — 10 MHz) from household and industrial sources have been insufficiently explored, with existing data remaining contradictory and primarily limited to young animals. Given the rapid aging of the global population, experimental assessment of how alternating magnetic fields affect cognitive function in an aged organism is of particular importance.

© Е.Е. Пряхин, И.А. Шапошникова, 2026

Objective. To assess the effects of a pulsed magnetic field on cognitive function and motor activity in physiologically aged mice.

Materials and methods. Cognitive function and motor activity were assessed using the Morris water maze (MWM) and open field behavioral test. Eighteen-month-old outbred CFW mice of both sexes were exposed to a pulsed magnetic field (PMF; 28 kHz, $140 \pm 15 \mu\text{T}$ per pulse) for 5 min daily over 5 consecutive days prior to the start of behavioral tests and subsequently for 5 min daily before MWM testing. Control animals were subjected to sham exposure following the same schedule.

Results. PMF-exposed mice exhibited enhanced learning ability compared to the control group. On day 5 of testing, the escape latency and path length to the hidden platform were significantly reduced by 30% compared to the control group, while the success rate of finding the platform increased by 75%. On day 6 of MWM testing, the probe trial revealed that PMF-exposed mice crossed the former platform location three times more frequently than controls. In the open field test, no statistically significant effect of PMF exposure on motor activity was observed.

Conclusions. A pulsed magnetic field with a pulse repetition frequency of 28 kHz and an induction of $140 \pm 15 \mu\text{T}$ reduces the natural decline in cognitive function. While further research is needed to clarify how the observed effects depend on PMF parameters (frequency, modulation, and exposure intensity), our findings suggest that PMF could potentially be used to address age-related cognitive changes in humans.

Keywords: pulsed magnetic field; learning ability; cognitive function; motor activity; mice; physiological aging; Morris water maze; open field

For citation: Priakhin E.E., Shaposhnikova I.A. Effects of a 28 kHz pulsed magnetic field on cognitive function in 18-month-old mice. *Extreme Medicine*. 2026. <https://doi.org/10.47183/mes.2026-501>

Funding. The work was carried out within the framework of a state assignment of the FMBA of Russia “Study of the effect of long-term radiation exposure in the early postnatal period on long-term behavioral and morphofunctional parameters of the central nervous system in an experiment” (No. 27.003.23.800, code: “System”).

Compliance with ethical principles. The study was carried out in compliance with the bioethical rules approved by the decision of the Board of the Eurasian Economic Commission (EEC) of 14.11.2023 No. 33 “On the Guidelines for the Care and Use of Laboratory (Experimental) Animals in Conducting Preclinical (Nonclinical) Studies” and the European Convention for the Protection of Vertebrate Animals used for Experimental and Other Purposes. The conduct of the study was approved at a meeting of the Bioethics Committee of the Southern Urals Federal Research and Clinical Center for Medical Biophysics (Minutes No. 1 of 03.04.2023).

Potential conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Use of AI tools. The authors declare that no artificial intelligence (AI) tools were used in manuscript preparation.

✉ Irina A. Shaposhnikova shaposhnikova@lenta.ru

Received: 6 Apr. 2026 **Revised:** 3 June 2026 **Accepted:** 10 June 2026 **Online first:** 21 Aug. 2026

ВВЕДЕНИЕ

В связи с распространением технологий, генерирующих электромагнитные поля (ЭМП), возрастает актуальность исследований их воздействия на биологические системы. Установлено, что ЭМП могут вызывать разнообразные биологические эффекты — как неблагоприятные [1, 2], так и обладающие терапевтическим потенциалом [3, 4]. Наибольший объем научных данных накоплен для полей крайне низкой частоты (<300 Гц), связанных с генерацией, передачей и использованием электроэнергии, а также полей радиочастотного диапазона (10 МГц — 300 ГГц), излучаемых, например, системами мобильной связи. В то же время потенциальное воздействие на организм полей промежуточной частоты (ПЧ) (300 Гц — 10 МГц) изучено значительно хуже [5, 6]. В последние годы наблюдается устойчивый рост количества бытовых устройств, генерирующих электромагнитные поля промышленной частоты. К таким устройствам относятся индукционные плиты, системы беспроводной передачи энергии, некоторые типы мониторов и электронные системы охраны. Расширение парка таких приборов в жилых помещениях закономерно ведет к увеличению фоновому уровню ЭМП ПЧ и продолжительности их воздействия на человека [7, 8]. Существующие экспериментальные данные указывают на потенциальное влияние ЭМП ПЧ на процессы внутриутробного развития, экспрессию генов и воспалительные реакции в организме. Однако результаты исследований демонстрируют значительную гетерогенность и нередко противоречат друг другу, что затрудняет формулирование

однозначных выводов [5]. Вероятно, это связано со сложной зависимостью биологического ответа от конкретных параметров воздействия электромагнитного поля: частоты, интенсивности, длительности и режима модуляции [9, 10].

Остается малоизученным влияние ЭМП ПЧ на когнитивные функции. Большинство проведенных исследований не обнаружило статистически значимого влияния на поведение и когнитивные функции [11–13], однако в ряде работ было зафиксировано ухудшение памяти при воздействии магнитных полей ПЧ как у лабораторных животных, так и у людей [14, 15].

Одним из факторов, влияющих на интенсивность проявления биологических эффектов, является режим модуляции поля. Многие публикации свидетельствуют о том, что импульсные магнитные поля (ИМП) способны вызывать более выраженные биологические эффекты по сравнению с немодулированными переменными полями аналогичной мощности [16, 17]. Тем не менее исследования нейрокогнитивных эффектов импульсного воздействия ЭМП ПЧ, в частности частотой 28 кГц, используемой в некоторых промышленных и бытовых устройствах, не проводились.

Учитывая рост доли пожилого населения в развитых странах, изучение воздействия факторов окружающей среды на указанную возрастную группу становится особенно актуальным. Существуют данные, свидетельствующие о повышенной чувствительности стареющего организма к магнитным полям, что, например, может быть связано с возрастным снижением нейропластичности [18]. В связи с этим использование модели мышей с физиологическим старением (18 мес.)

в настоящем исследовании позволяет оценить потенциальные эффекты ИМП на более уязвимую и демографически репрезентативную группу.

Цель исследования — оценка влияния импульсного магнитного поля на когнитивные функции и двигательную активность у мышей при физиологическом старении.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В экспериментах использовали мышей аутбредного стока CFW в возрасте 18 мес. собственного разведения. Животных содержали в виварии Южно-Уральского федерального научно-клинического центра медицинской биофизики (г. Челябинск) при естественном освещении на полноценном рационе; доступ к воде не ограничивали. В экспериментах по оценке влияния ИМП на когнитивные функции у мышей изучали 37 животных: 19 самцов и 18 самок. У самок не определяли стадию эструса, так как к этому возрасту эстральный цикл у лабораторных мышей прекращается [19].

Случайным образом были сформированы 4 основные экспериментальные группы: 1-ю и 2-ю группы составляли самцы (9 животных) и самки (10 животных), которых подвергали воздействию ИМП. Мышей из групп 3 и 4 подвергали ложному воздействию (ЛВ): группа 3 состояла из 10 самцов, а группа 4 — из 8 самок.

Дополнительно были сформированы экспериментальные группы мышей для оценки влияния ИМП на двигательную активность животных: 10 самцов и 5 самок подвергали воздействию ИМП; 9 самцов и 4 самки подвергали ложному воздействию по схеме, аналогичной схеме изучения влияния на когнитивные функции. Этим животных не тестировали методом «Водный лабиринт Морриса» (ВЛМ); изучение двигательной активности проводили с использованием теста «Открытое поле» (ОП) после завершения экспериментального воздействия ИМП или ЛВ. Кроме этого, мышей через 1 ч после проведения последней попытки в водном лабиринте Морриса также обследовали с помощью теста ОП.

Средняя масса самцов мышей в группах, подвергавшихся воздействию ИМП, составила $48,3 \pm 2,6$ г, в группах с ложным воздействием — $45,4 \pm 2,2$ г. Средняя масса самок в группах с ИМП составила $43,7 \pm 2,6$ г, в группах с ложным воздействием — $39,9 \pm 2,1$ г.

Для оценки влияния ИМП на биологические эффекты применяли генератор импульсного магнитного поля [20]. Параметры ИМП: поле модулировано последовательностью пакетов импульсов; передний фронт каждого импульса имеет длительность 40 нс; задний фронт характеризуется параболическим спадом амплитуды; частота повторения пакетов — 28 кГц; длительность пакета (по уровню 0,7 от максимального значения) — 2 мкс; индукция магнитного поля в импульсе на расстоянии 40 см от торца генератора — 140 ± 15 мкТл в месте расположения мышей.

Для оценки влияния ИМП на все стадии формирования памяти (приобретение/обучение, консолидация и воспроизведение/извлечение), воздействие ИМП проводили по 5 мин в течение 5 сут до тестирования когнитивных функций и каждый день за 5 мин до тестирования в ВЛМ [21]. Для стандартизации и обеспечения равномерного воздействия ИМП животных размещали в кассетах из оргстекла, где они находились в отдельных ячейках; экспозиции подвергали по 4–5 животных одновременно. Каждый раз перед тестированием в водном лабиринте мышей подвергали воздействию ИМП индивидуально.

В качестве контроля использовали животных из групп ЛВ, где мышей подвергали тем же манипуляциям, что и при воздействии ИМП, но генератор ИМП не включали.

В группах по изучению влияния ИМП на двигательную активность животных подвергали воздействию по такой же схеме, как при изучении когнитивных функций. Схема экспериментов приведена на рисунке 1.

Когнитивные функции у мышей определяли с помощью теста ВЛМ, который является надежным и достоверным методом оценки обучаемости и пространственной памяти, связанных с синаптической пластичностью гиппокампа и функцией NMDA-рецепторов

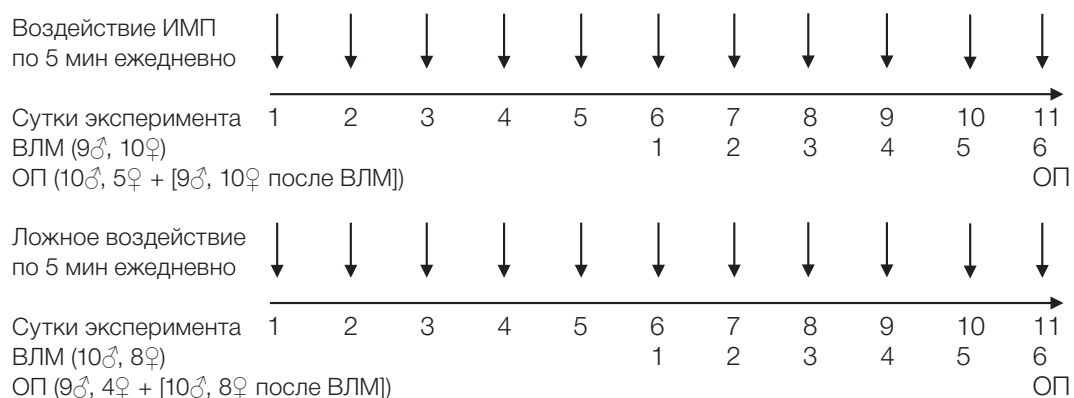


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 1. Дизайн экспериментов по изучению влияния импульсного магнитного поля на когнитивные функции животных. ИМП — импульсное магнитное поле; ВЛМ — тест «Водный лабиринт Морриса»; ОП — тест «Открытое поле»; ♂ — самцы; ♀ — самки; в круглых скобках указано количество животных в экспериментальных группах; в квадратных скобках указано количество обследованных мышей в тесте «Открытое поле» после тестирования методом «Водный лабиринт Морриса»

у экспериментальных животных [22, 23]. Испытание ВЛМ проводили в круглом бассейне диаметром 1,5 м со стенками черного цвета. Бассейн заполняли водой комнатной температуры ($24 \pm 0,5$ °C) до уровня 0,3 м. Скрытую квадратную платформу черного цвета со сторонами 10×10 см помещали в 1 м от центра бассейна. Поверхность платформы находилась на глубине 1 см под поверхностью воды. Платформа оставалась в одном и том же месте в течение 5 дней тестирования. На стенках бассейна были размещены 2 пары диаметрально противоположных рисунков черно-белого цвета, изображающих легко различимые простые геометрические фигуры.

Испытание ВЛМ выполняли в течение 6 сут. С 1-х по 5-е сут проводили по 4 попытки для каждого животного. В начале каждой попытки мышь помещали в бассейн головой к одному из 4 рисунков. Максимальная длительность поиска скрытой платформы 60 с. Если мышь находила скрытую платформу в течение 60 с, то попытку заканчивалась. Если платформа не была найдена за 60 с плавания, мышь помещали на платформу и оставляли там на 15 с, после чего осуществляли следующую попытку. На 6-е сут обследования проводили 1 попытку. Платформу убрали из бассейна, оценивали количество пересечений места расположения платформы за 30 с, производили видеофиксацию поведения мышей в бассейне. Камеру располагали над бассейном. С помощью программы AsioOtus Lab, ООО «НПК Открытая Наука» анализировали время, длину траектории поиска скрытой платформы, частоту успешного поиска скрытой платформы, количество пересечений места расположения платформы на 6-е сут обследования.

Для обеспечения аккуратной интерпретации данных, полученных в тесте ВЛМ, оценивали воздействие ИМП на двигательную активность в тесте ОП [24], так как изменение двигательной активности может влиять на результаты ВЛМ [25, 26].

Испытание в тесте ОП проводили в квадратном аппарате 420×420×420 мм со стенками черного цвета и полом белого цвета, на который нанесена черная сетка, делящая поле на 25 (5×5) равных квадратов. В узлах сетки находились отверстия («норки»). Перед каждым тестированием поле протирали 70% этиловым спиртом и высушивали для устранения посторонних запахов. Мышь помещали в центр размеченной сетки и позволяли в течение 5 мин свободно перемещаться по всему полю. С помощью счетчика подсчитывали пересечения горизонтальных квадратов, вертикальные стойки на задних лапах, исследование норок, акты груминга и количество экскрементов (болюсов), оставленных животным в течение попытки.

Для проведения статистического анализа использовали пакет R (Version 4.3.1; R Core Team, 2025)¹. Рассчитывали среднее значение (M) и стандартную ошибку (SE). Оценивали распределение анализируемых показателей: в случае, если распределение отличалось от нормального, применяли непараметрические методы сравнения (тест Вилкоксона – Манна – Уитни); в случае нормального распределения для попарного сравнения показателей применяли t -критерий Стьюдента. Для оценки влияния различных факторов

проводили многофакторный дисперсионный анализ в обобщенной линейной модели. Для оценки зависимости показателей от дня обследования проводили регрессионный анализ. Различия принимали статистически значимыми при вероятности нулевой гипотезы $p \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В группе ЛВ средняя продолжительность поиска скрытой платформы в 1-е сут тестирования в ВЛМ для мышей обоих полов составила $57,8 \pm 1,1$ с: у самцов — $59,0 \pm 0,7$ с, у самок — $56,3 \pm 2,2$ с (табл. 1). В процессе тестирования за 5 сут мыши обучались быстрее находить скрытую платформу, и на 5-е сут в группе ЛВ им для успешного поиска потребовалось $47,3 \pm 2,3$ с: у самцов — 48 ± 3 с, у самок — 46 ± 5 с. Длина траектории поиска скрытой платформы у животных из группы ЛВ (самцы и самки) на 1-е сут составила 1090 ± 30 см: у самцов — 1120 ± 30 см, у самок — 1050 ± 50 см. На 5-е сут этот показатель составил 940 ± 50 см: у самцов — 910 ± 60 см, у самок — 990 ± 80 см. Частота успешного поиска скрытой платформы в группе ЛВ в 1-е сут обследования составила $7 \pm 3\%$: у самцов — $5 \pm 3\%$, у самок — $9 \pm 5\%$. На 5-е сут мыши в группе ЛВ значительно лучше (в $33 \pm 6\%$ случаев) находили скрытую под водой платформу: самцы — в $30 \pm 7\%$, самки — в $38 \pm 9\%$. При проведении однофакторного дисперсионного анализа было выявлено, что пол не влиял на продолжительность поиска скрытой платформы ($F = 0,79$; $p = 0,37$), длину траектории поиска скрытой платформы ($F = 0,09$; $p = 0,76$) и частоту успешного поиска ($F = 2,38$; $p = 0,12$), поэтому в дальнейшем показатели оценки когнитивных функций в ВЛМ анализировали без разделения по полу.

В экспериментальной группе, где мышей подвергали воздействию ИМП в течение 5 сут до начала тестирования, время поиска скрытой платформы в 1-е сут тестирования составило $53,2 \pm 1,9$ с, что статистически значимо отличалось от группы ЛВ (табл. 1). Частота успешного поиска скрытой платформы в 1-е сут тоже статистически значимо была существенно выше, чем в группе ЛВ, и составляла $20 \pm 5\%$. Воздействие ИМП на животных в возрасте 18 мес. привело к статистически значимому улучшению показателей во все сроки исследования, кроме 3-х сут. С каждым днем тестирования различия в экспериментальных группах нарастали: на 5-е сут средняя продолжительность поиска скрытой платформы и средняя длина траектории в группе ИМП были на 35% меньше и составляли $32,7 \pm 2,8$ с и 640 ± 60 см соответственно. При этом частота успешного поиска скрытой платформы была больше в 2,5 раза по сравнению с группой ЛВ и составила $63 \pm 6\%$ (табл. 1).

На 6-е сут тестирования в ВЛМ удаляли скрытую под водой платформу, проводили 1 попытку, в которой определяли количество пересечений места расположения платформы за 30 с. В этих экспериментах было выявлено, что самцы мышей в группе ЛВ в среднем пересекали место расположения скрытой платформы $0,40 \pm 0,16$ раза, самки — $0,25 \pm 0,16$ раза, в объединенной группе самцов и самок — $0,33 \pm 0,11$ раза. В группе самцов, которых

¹ R Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna; 2025. <https://www.R-project.org/>

Таблица 1. Результаты анализа когнитивных функций мышей после воздействия импульсного магнитного поля с применением метода водного лабиринта Морриса ($M_e \pm SE$)

Наименование группы	Сутки исследования	Пол	Продолжительность поиска платформы, с	Длина траектории поиска платформы, см	Частота успешного поиска платформы, %
Группа контроля (ложное воздействие)	1	♂	$59,0 \pm 0,7$	1120 ± 30	5 ± 3
		♀	$56,3 \pm 2,2$	1050 ± 50	9 ± 5
		♂ + ♀	$57,8 \pm 1,1$	1090 ± 30	7 ± 3
	2	♂	$55,3 \pm 2,1$	1030 ± 50	15 ± 6
		♀	$55,0 \pm 2,4$	1010 ± 60	16 ± 7
		♂ + ♀	$55,2 \pm 1,6$	1020 ± 40	15 ± 4
	3	♂	$44,5 \pm 3,6$	830 ± 80	33 ± 8
		♀	$45,8 \pm 3,6$	1000 ± 90	44 ± 9
		♂ + ♀	$45,1 \pm 2,6$	900 ± 60	38 ± 6
	4	♂	$51,0 \pm 2,9$	960 ± 70	23 ± 7
		♀	$46,0 \pm 3,8$	970 ± 90	41 ± 9
		♂ + ♀	$48,8 \pm 2,3$	970 ± 50	31 ± 5
	5	♂	48 ± 3	910 ± 60	30 ± 7
		♀	46 ± 4	990 ± 80	38 ± 9
		♂ + ♀	$47,3 \pm 2,3$	940 ± 50	33 ± 6
Экспериментальная группа (импульсное магнитное поле)	1	♂	$56,7 \pm 2,1$	1070 ± 50	14 ± 6
		♀	$50,0 \pm 2,9$	920 ± 60	25 ± 7
		♂ + ♀	$53,2 \pm 1,9^*$	990 ± 40	$20 \pm 5^*$
	2	♂	$46,5 \pm 3,5^*$	930 ± 80	33 ± 8
		♀	$44,6 \pm 3,4^*$	$830 \pm 70^*$	$40 \pm 8^*$
		♂ + ♀	$45,5 \pm 2,4^*$	$880 \pm 50^*$	$37 \pm 6^*$
	3	♂	$46,7 \pm 3,4$	900 ± 80	36 ± 8
		♀	$40,6 \pm 3,5$	790 ± 70	53 ± 8
		♂ + ♀	$43,5 \pm 2,4$	840 ± 50	45 ± 6
	4	♂	$33,7 \pm 3,9^*$	$710 \pm 90^*$	$61 \pm 8^*$
		♀	$39,4 \pm 3,5$	790 ± 70	53 ± 8
		♂ + ♀	$36,7 \pm 2,6^*$	$750 \pm 60^*$	$57 \pm 6^*$
	5	♂	$27,2 \pm 3,9^*$	$550 \pm 80^*$	$78 \pm 7^*$
		♀	$37,6 \pm 3,7$	$720 \pm 80^*$	50 ± 8
		♂ + ♀	$32,7 \pm 2,8^*$	$640 \pm 60^*$	$63 \pm 6^*$

Таблица составлена авторами по собственным данным

Примечание. M_e — среднее значение; SE — стандартная ошибка; * — статистически значимые отличия от аналогичной контрольной группы (ложное воздействие), $p < 0,05$.

подвергали воздействию ИМП, среднее значение показателя составило $1,3 \pm 0,5$ раза ($t = 1,87$; $p = 0,07$), у самок — $0,70 \pm 0,26$ раза ($t = 1,46$; $p = 0,16$), в объединенной

группе самцов и самок — $1,00 \pm 0,27$ раза, что статистически значимо (в 3 раза) превышало значение показателя в группе ЛВ ($t = 2,31$; $p = 0,04$).

При проведении многофакторного анализа в обобщенной линейной модели оценивали влияние следующих факторов на анализируемые показатели ВЛМ: пол животных; воздействие ИМП; сутки обследования (табл. 2). Было выявлено, что пол животных не влиял ни на один из анализируемых показателей. На длительность поиска скрытой платформы с очень высокой статистической значимостью оказывает воздействие ИМП и сутки исследования. По данным многофакторного дисперсионного анализа в обобщенной линейной модели в результате применения ИМП длительность поиска скрытой платформы снижается в среднем на $8,4 \pm 1,5$ с по сравнению с группой ЛВ. Применение ИМП с очень высоким уровнем статистической значимости снижало длину траектории поиска скрытой платформы в среднем на 160 ± 30 см и увеличивало частоту успешного поиска скрытой платформы в среднем на $19 \pm 3\%$. На 6-е сут обследования в группе ИМП наблюдалось статистически значимое увеличение среднего числа пересечения места расположения скрытой платформы на $0,69 \pm 0,29$. Таким образом, воздействие ИМП на мышей в возрасте 18 мес. приводило к улучшению пространственной ориентации и памяти.

Для оценки влияния ИМП на обучаемость был проведен регрессионный анализ зависимости анализируемых показателей от дня проведения эксперимента [27–29]. У животных из группы ЛВ длительность и длина траектории поиска скрытой платформы закономерно уменьшались, а частота поиска скрытой платформы, соответственно, увеличивалась с каждым днем.

Зависимость длительности поиска скрытой платформы от дня проведения эксперимента удовлетворительно описывается линейной функцией. В группе ЛВ уравнение зависимости ($R^2 = 0,05$; $F = 17,43$; $p < 0,001$) имело вид $y = 59 - 2,7x$, в группе ИМП ($R^2 = 0,10$;

$F = 42,30$; $p < 0,001$) — $y = 57,3 - 5,0x$ (где y — время поиска скрытой платформы, с; x — сутки исследования). Результаты ежедневных испытаний в ВЛМ показали статистически значимое снижение времени поиска скрытой платформы у экспериментальной группы (воздействие ИМП) по сравнению с контрольной группой (ЛВ), причем эффект усиливался с каждым последующим днем тестирования (рис. 2А.). Угловым коэффициентом линии регрессии был статистически значимо ($t = 2,23$; $p = 0,03$) больше по модулю в группе ИМП ($-5,0 \pm 0,8$) по сравнению с показателем в группе ЛВ ($-2,7 \pm 0,7$), что подтверждает наблюдение об улучшении обучаемости мышей в случае ИМП.

Зависимость длины траектории поиска скрытой платформы в группе ЛВ от дня проведения исследования также удовлетворительно описывалась линейной функцией ($R^2 = 0,01$; $F = 5,20$; $p = 0,023$) $y = 1090 - 35x$, а в группе с воздействием ИМП ($R^2 = 0,06$; $F = 25,59$; $p < 0,001$) имела вид $y = 1070 - 82x$ (где y — длина траектории поиска скрытой платформы, см; x — сутки проведения исследования). Угловым коэффициентом линии регрессии был статистически значимо ($t = 2,16$; $p = 0,031$) больше по модулю в группе ИМП (-82 ± 16) по сравнению с показателем в группе ЛВ (-35 ± 15) (рис. 2Б).

Линейная зависимость частоты успешного поиска скрытой платформы в группе ЛВ от дня тестирования описывалась линейной функцией: $R^2 = 0,05$; $F = 18,75$; $p < 0,001$; $y = 0,04 + 0,068x$, а в группе с воздействием ИМП — $R^2 = 0,09$; $F = 38,35$; $p < 0,001$; $y = 0,12 + 0,107x$, где y — частота успешного поиска скрытой платформы, x — сутки проведения исследования. Угловым коэффициентом регрессии зависимости частоты нахождения платформы в группе ИМП был несколько выше ($0,107 \pm 0,017$) по сравнению с группой ЛВ

Таблица 2. Результаты многофакторного дисперсионного анализа в обобщенной линейной модели параметров оценки когнитивных функций мышей с использованием водного лабиринта Морриса

Показатели	Факторы	F	p	Значение коэф-фициента в ОЛМ
Время поиска скрытой платформы, с	Пол	0,14	0,70	0
	Импульсное магнитное поле	32,09	<<0,001	$-8,4 \pm 1,5$
	Сутки исследования*	54,95	<<0,001	$-3,9 \pm 0,5$
Длина траектории поиска скрытой платформы, см	Пол	0,01	0,92	0
	Импульсное магнитное поле	24,60	<<0,001	-160 ± 30
	Сутки исследования*	25,11	<<0,001	-57 ± 11
Частота успешного поиска скрытой платформы, %	Пол	1,64	0,20	0
	Импульсное магнитное поле	30,68	<<0,001	19 ± 3
	Сутки исследования*	53,15	<<0,001	$8,6 \pm 1,2$
Число пересечений места расположения скрытой платформы на 6-е сутки проведения эксперимента	Пол	1,88	0,18	0
	Импульсное магнитное поле	5,75	0,03	$0,69 \pm 0,29$

Таблица составлена авторами по собственным данным

Примечание. * — сутки исследования — количественная переменная, значение коэффициента в обобщенной линейной модели (ОЛМ) отражает угол наклона линейной зависимости показателя от дня исследования.

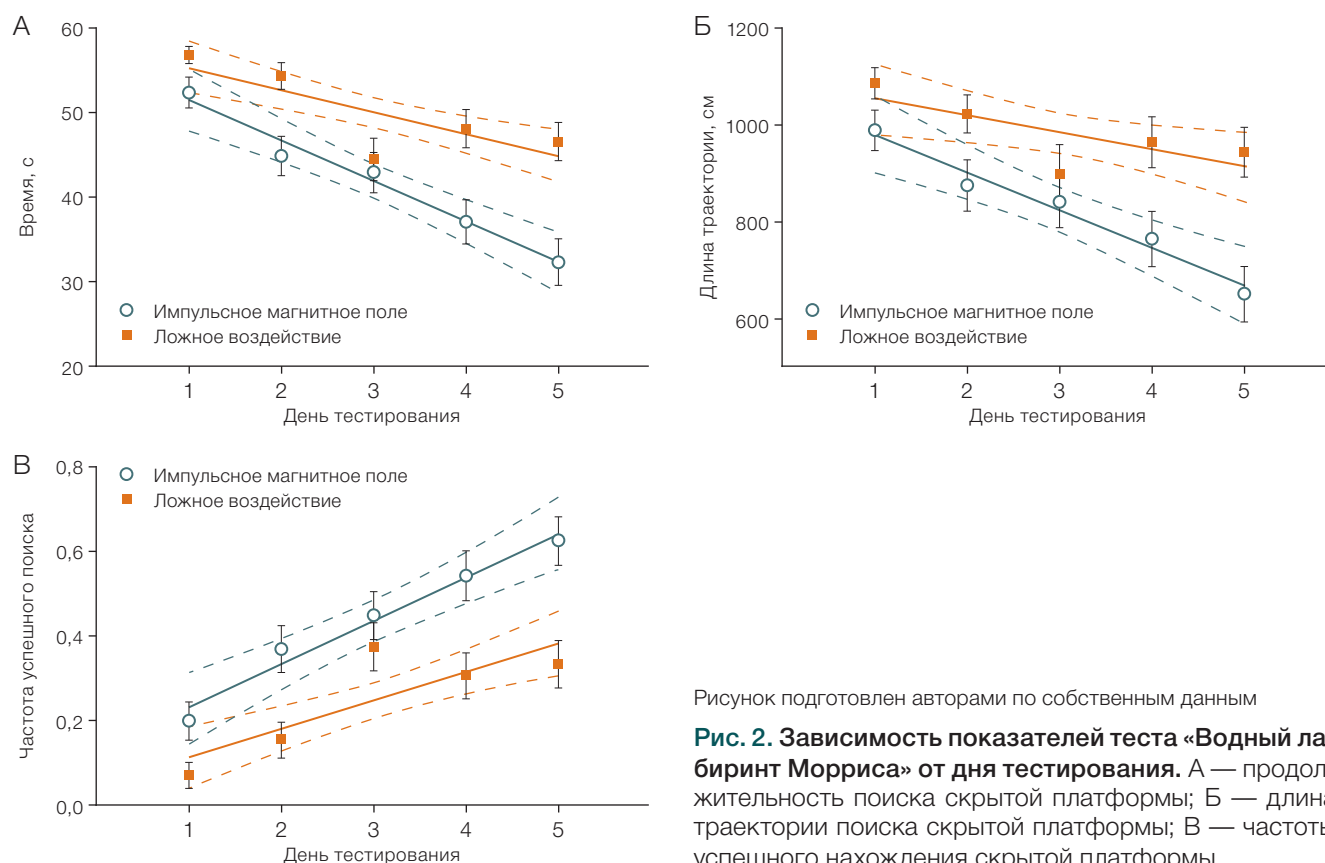


Рисунок подготовлен авторами по собственным данным

Рис. 2. Зависимость показателей теста «Водный лабиринт Морриса» от дня тестирования. А — продолжительность поиска скрытой платформы; Б — длина траектории поиска скрытой платформы; В — частоты успешного нахождения скрытой платформы

($0,068 \pm 0,016$), однако эти различия не достигали статистической значимости ($t = 1,65$; $p = 0,10$) (рис. 2В).

Результаты анализа угла наклона линии регрессии зависимости времени и длины поиска скрытой платформы указывают на то, что воздействие ИМП на мышей в возрасте 18 мес. приводит к улучшению их обучаемости.

Важным этапом анализа когнитивных функций является оценка двигательной активности у животных [30], которая может оказывать влияние на показатели оценки когнитивных функций в ВЛМ [25, 26]. В наших исследованиях двигательную активность оценивали с помощью метода «Открытое поле» (ОП).

Двигательную активность определяли по количеству пройденных горизонтальных квадратов и количеству вертикальных стоек. Следует отметить, что двигательная активность у самцов была выше, чем у самок, что выражалось в большем количестве пройденных квадратов. Количество пройденных квадратов и в 1-й ($t = 2,55$; $p = 0,027$), и во 2-й ($t = 3,9$; $p = 0,007$) сериях экспериментов у самцов было статистически значительно больше (почти в 2 раза) по сравнению с самками. Количество вертикальных стоек также было больше у самцов, чем у самок. Но в 1-й серии экспериментов эти различия были статистически достоверны ($t = 2,59$; $p = 0,025$), а во 2-й не достигали статистической значимости ($t = 1,61$; $p = 0,13$).

ИМП не оказывало статистически значимого влияния на двигательную активность мышей (табл. 3). Это позволяет обоснованно интерпретировать результаты, полученные в ВЛМ, как проявление улучшения обучаемости и памяти, а не повышения двигательной активности у животных.

Количество экскрементов (болюсов) и частота груминга являются проявлением тревожности у мышей в тесте «Открытое поле» [24]. В наших экспериментах было выявлено, что в группах, подвергавшихся воздействию ИМП, количество экскрементов (болюсов) и частота груминга были всегда больше, чем в группах ЛВ. Однако статистически значимыми такие отличия были только в объединенной группе (самцы и самки, 1-я и 2-я серии экспериментов) при анализе количества экскрементов (болюсов) ($t = 2,04$; $p = 0,046$) и у самцов в объединенной группе (1-я и 2-я серии экспериментов) при анализе количества актов груминга ($t = 2,32$; $p = 0,026$); это позволяет предположить, что, кроме воздействия на когнитивные функции, ИМП, вероятно, может приводить к повышению тревожности.

В тесте «Открытое поле» количество норок отражает исследовательскую активность животных [24]. В наших экспериментах не было выявлено статистически значимого влияния ИМП при анализе количества норок (табл. 3). Однако в группах мышей, где их тестировали в «открытом поле» после серии опытов в ВЛМ, они чаще исследовали норки по сравнению с животными, которые не проходили ВЛМ: количество норок у мышей из 2-й серии экспериментов (самцы и самки, ЛВ и ИМП) составило $4,6 \pm 0,5$, а у мышей из 1-й серии экспериментов (самцы и самки, ЛВ и ИМП) было равно $2,4 \pm 0,3$ ($t = 3,55$; $p < 0,001$).

ОБСУЖДЕНИЕ

Выявлено, что импульсное магнитное поле с частотой повторения импульсов 28 кГц и индукцией магнитного поля в импульсе 140 ± 15 мкТл оказывает существенное

Таблица 3. Результаты анализа поведения мышей после воздействия импульсного магнитного поля с применением теста «Открытое поле» ($M_e \pm SE$)

Наименование группы	Тип эксперимента	Пол	Горизонтальная активность (пересеченные квадраты)	Вертикальная активность (стойки)	Количество экскрементов (болюсов)	Акты груминга	Исследовательская активность (норки)
Группа контроля (ложное воздействие)	«Открытое поле»	♂	95 ± 16	14 ± 4	1,3 ± 0,5	2,5 ± 0,5	3,1 ± 0,5
		♀	46 ± 11	3,3 ± 1,3	2,3 ± 1,0	2 ± 0	2,3 ± 0,9
		♂ + ♀	80 ± 13	11 ± 3	1,6 ± 0,5	2,3 ± 0,3	2,8 ± 0,4
Экспериментальная группа (импульсное магнитное поле)		♂	91 ± 12	17 ± 3	2,1 ± 0,4	3,3 ± 0,5	2,1 ± 0,3
		♀	33 ± 13	3,8 ± 1,5	2,8 ± 1,1	1,8 ± 1,1	1,8 ± 1,1
		♂ + ♀	72 ± 11	12 ± 3	2,3 ± 0,4	2,8 ± 0,5	2,0 ± 0,4
Группа контроля (ложное воздействие)	«Водный лабиринт Морриса» + «Открытое поле»	♂	89 ± 6	11,9 ± 1,3	1,3 ± 0,3	1,5 ± 0,4	6,3 ± 1,2
		♀	54 ± 10	8,3 ± 1,9	0,9 ± 0,4	2,5 ± 0,4	4,1 ± 1,0
		♂ + ♀	73 ± 7	10,3 ± 1,1	1,1 ± 0,2	1,9 ± 0,3	5,3 ± 0,8
Экспериментальная группа (импульсное магнитное поле)		♂	72 ± 6	11,2 ± 1,4	2,3 ± 0,8	3,0 ± 0,6	4,2 ± 1,4
		♀	49 ± 12	8,3 ± 2,5	1,6 ± 0,3	5,6 ± 3	3,7 ± 0,7
		♂ + ♀	60 ± 7	9,7 ± 1,5	1,9 ± 0,4	4,4 ± 1,6	3,9 ± 0,7
Группа контроля (ложное воздействие)	Суммарные данные по двум сериям экспериментов	♂	92 ± 8	12,9 ± 1,9	1,3 ± 0,3	1,9 ± 0,3	4,8 ± 0,7
		♀	51 ± 7	6,6 ± 1,5	1,3 ± 0,4	2,3 ± 0,3	3,5 ± 0,7
		♂ + ♀	76 ± 7	10,5 ± 1,4	1,3 ± 0,2	2,1 ± 0,2	4,3 ± 0,5
Экспериментальная группа (импульсное магнитное поле)		♂	82 ± 7	14,1 ± 1,9	2,2 ± 0,4	3,2 ± 0,4*	3,1 ± 0,7
		♀	44 ± 9	6,8 ± 1,8	2,0 ± 0,4	4,3 ± 2	3,1 ± 0,6
		♂ + ♀	65 ± 6	10,9 ± 1,4	2,1 ± 0,3*	3,7 ± 0,9	3,1 ± 0,5

Таблица составлена авторами по собственным данным

Примечание. M_e — среднее значение; SE — стандартная ошибка; * — статистически значимые отличия от аналогичной контрольной группы (ложное воздействие), $p < 0,05$.

влияние на обучаемость и память у мышей стока CWF в возрасте 18 мес. При воздействии ИМП за 5 сут до тестирования в ВЛМ по 5 мин ежедневно было зарегистрировано уменьшение длительности и повышение частоты успешного поиска скрытой платформы в 1-е сут тестирования в ВЛМ. У мышей, которых подвергали воздействию ИМП, с каждым днем тестирования нарастали различия анализируемых показателей (длительность и длина траектории, частота успешного поиска скрытой платформы) по сравнению с группой ЛВ. Наклон линии регрессии для длительности и длины траектории поиска скрытой платформы статистически значимо был больше в группах, где животные подвергались воздействию ИМП. Такие результаты можно интерпретировать как улучшение их обучаемости. На 5-е сут длительность поиска и длина траектории поиска скрытой платформы высокодостоверно были на 30% меньше по сравнению с группой ЛВ, а частота успешного поиска скрытой платформы увеличилась на 75%. На 6-е сут тестирования, во время финальной попытки, в отсутствие скрытой платформы,

при определении числа пересечений места ее расположения было выявлено трехкратное статистически значимое увеличение этого показателя у животных, подвергшихся воздействию ИМП.

В проведенном тесте «Открытое поле» не было обнаружено статистически значимого влияния ИМП на двигательную активность мышей. Это позволяет уверенно интерпретировать выявленные изменения анализируемых параметров в ВЛМ как улучшение обучаемости и памяти, а не как повышение двигательной активности при воздействии ИМП. Кроме того, в тесте «Открытое поле» было выявлено увеличение количества экскрементов, оставленных мышами на открытом поле за время тестирования, и увеличение количества актов груминга у самцов, что позволяет предположить, что ИМП, помимо воздействия на когнитивную функцию, может приводить к повышению уровня тревожности у мышей. Однако это предположение требует верификации в других тестах.

В ряде публикаций сообщается, что воздействие ПЧ-полей либо не приводило к статистически

значимым когнитивным изменениям [11–13], либо вызывало их ухудшение [14, 15]. Мы полагаем, что данные различия могут быть объяснены в основном двумя факторами, заложенными в дизайн нашего эксперимента. Во-первых, это применение импульсной модуляции магнитного поля. Исследования, не выявившие эффекта или показавшие негативное влияние, проводились с помощью немодулированных переменных полей. При этом существуют данные, что ИМП может индуцировать более выраженные биологические эффекты [16, 17], в том числе улучшение когнитивных функций [31–33]. Во-вторых, это использование модели животных в возрасте физиологического старения в нашем эксперименте. Работы, не установившие значимого влияния ПЧ-полей, выполнялись на молодых, здоровых животных, а также в клинических экспериментах с участием молодых людей. Животные с возрастным снижением когнитивных функций представляют собой более чувствительную модель, с применением которой улучшение

когнитивных функций может оказаться более выраженным и заметным [34]. Сочетание указанных факторов могло привести к обнаружению ранее не описанного эффекта улучшения когнитивных функций при воздействии переменного магнитного поля промежуточной частоты (28 кГц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Импульсное магнитное поле с частотой повторения импульсов 28 кГц и индукцией 140 ± 15 мкТл уменьшает у мышей в возрасте 18 мес. естественный спад когнитивных функций, связанный с физиологическим старением. Полученные результаты требуют проведения дополнительных исследований для уточнения зависимости выявленных эффектов от параметров ИМП (частоты, модуляции, интенсивности воздействия). Обнаруженные эффекты позволяют предположить возможность применения ИМП для коррекции возрастных изменений когнитивных функций у человека.

Литература / References

- Naarala J, Kolehmainen M, Juutilainen J. Electromagnetic fields, genomic instability and cancer: A systems biological view. *Genes*. 2019;10(6):479. <https://doi.org/10.3390/genes10060479>
- Schuermann D, Mevissen M. Manmade electromagnetic fields and oxidative stress-biological effects and consequences for health. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021;22(7):3772. <https://doi.org/10.3390/ijms22073772>
- Еськов ЕК. Биологические эффекты электромагнитных полей. М.: ИНФРА-М; 2024. Eskov EK. *Biological Effects of Electromagnetic Fields*. Moscow: INFRA-M; 2024 (In Russ.). <https://doi.org/10.12737/1229809>
- Flatscher J, Lorie EP, Mittermayr R, Meznik P, Slezak P, Red H, et al. Pulsed electromagnetic fields (PEMF) — physiological response and its potential in trauma treatment. *International Journal of Molecular Sciences*. 2023;24(14):11239. <https://doi.org/10.3390/ijms241411239>
- Bodewein L, Schmiedchen K, Dechent D, Stunder D, Graefrath D, Winter L, et al. Systematic review on the biological effects of electric, magnetic and electromagnetic fields in the intermediate frequency range (300 Hz to 1 MHz). *Environmental Research*. 2019;171:247–59. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.01.015>
- Степанова ОА, Шоларь СА, Пеньков МН. Влияние электромагнитного поля частотой 300 Гц на морскую биоту. *Системы контроля окружающей среды*. 2023;4(54):34–40. Stepanova OA, Sholar SA, Penkov MN. The effect of a 300 Hz electromagnetic field on marine biota. *Systems of Environmental Control*. 2023;4(54):34–40 (In Russ.). EDN: QBWUQA
- Каляда ТВ, Плеханов ВП. Актуальность мониторинга магнитных полей промышленной частоты 50 Гц в жилых и общественных зданиях. *Гигиена и санитария*. 2019;98(6):597–600. Kalyada TV, Plekhanov VP. Topicality of monitoring of industrial frequency magnetic fields of 50 Hz in residential and public buildings. *Journal of Hygiene and Sanitation*. 2019;98(6):597–600 (In Russ.). <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-6-597-600>
- Ikuyo M, Esaki K, Aimoto A, Wake K, Yamaguchi-Sekino S, Kojimahara N, et al. Measurement and exposure assessment of intermediate frequency magnetic fields from electronic article surveillance (EAS) gates in libraries. *Frontiers in Public Health*. 2022;10:871134. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.871134>
- Раваева МЮ, Черетаев ИВ, Чуян ЕН, Галенко-Ярошевский ПА. Моделирующее действие низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты на тканевую окислительный метаболизм и микрогемодинамику в коже. *Биомедицина*. 2023;19(4):35–46. Ravayeva MYu, Cheretaev IV, Chuyan EN, Galenko-Yaroshevsky PA. Modeling effect of low-intensity extremely high frequency electromagnetic radiation on tissue oxidative metabolism and microhemodynamics in the skin. *Biomedical Journal*. 2023;19(4):35–46 (In Russ.). <https://doi.org/10.33647/2074-5982-19-4-35-46>
- Дмитриев АС, Аистова ЛГ, Грязнов ВГ, Ицков ВВ, Рыжов АИ и др. О взаимодействии модулированных электромагнитных полей с живыми биологическими организмами. *Физические основы приборостроения*. 2024;13(3):56–75. Dmitriev AS, Aistova LG, Gryaznov VG, Itskov VV, Ryzhov AI, Turkanov IF, et al. On the interaction of modulated electromagnetic fields with living biological organisms. *Physical Foundations of Instrumentation*. 2024;13(3):56–75 (In Russ.). EDN: ZPDFDM
- Curcio G. Exposure to mobile phone-emitted electromagnetic fields and human attention: no evidence of a causal relationship. *Frontiers in Public Health*. 2018;6:42. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2018.00042>
- Benke G, Abramson MJ, Brzozek C, McDonald S, Kelsall H, Sanagou M et al. The effects of radiofrequency exposure on cognition: A systematic review and meta-analysis of human observational studies. *Environment International*. 2024;188:108779. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2024.108779>
- Zhao J, Ma J, Wang X, Zhang B. Effects of electromagnetic field emitted by a 90 kHz WPT system on the cognitive functions and neuronal excitation of mice. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2025;44(1):1–16. <https://doi.org/10.1080/15368378.2024.2438607>
- Ширяева НВ, Вайдо АИ, Павлова МБ, Сурма СВ, Щеголев БФ. Влияние электромагнитных излучений на ориентировочно-исследовательскую активность и когнитивные функции крыс с контрастной возбудимостью нервной системы. *Интегративная физиология*. 2020;1(2):123–32. Shiryayeva NV, Vaido AI, Pavlova MB, Surma SV,

- Shchegolev BF. The effect of electromagnetic radiation on exploratory activity and cognitive functions in rats with contrasting nervous system excitability. *Integrative Physiology*. 2020;1(2):123–32 (In Russ.). <https://doi.org/10.33910/2687-1270-2020-1-2-123-132>
15. Hao Y, Liu W, Xu Z, Jin X, Ye Y, Yu C, et al. High-power electromagnetic pulse exposure of healthy mice: assessment of effects on mice cognitions, neuronal activities, and hippocampal structures. *Frontiers in Cellular Neuroscience*. 2022;16:898164. <https://doi.org/10.3389/fncel.2022.898164>
 16. Глушченков ВА, Волова ЛТ, Беляева ИА, Роденко НА, Болтовская ВВ. Факторы магнитно-импульсного воздействия, влияющие на морфологические изменения биологической клетки. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2022;24(1):24–9. Glushchenkov VA, Volova LT, Belyaeva IA, Rodenko NA, Boltovskaya VV. Factors of magnetic-pulse exposure affecting morphological changes in a biological cell. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2022;24(1):24–9 (In Russ.). <https://doi.org/10.37313/1990-5378-2022-24-1-24-29>
 17. Wang P, Wang X, Wang Q, Jiao Y, Wang X, Chen C, et al. Cognitive improvement via a modulated rhythmic pulsed magnetic field in D-galactose-induced accelerated aging mice. *Brain Research*. 2023;1810:148372. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2023.148372>
 18. Hadzibegovic S, Nicole O, Andelkovic V, Poulliet de Gannes F, Hurtier A, Lagroye I, et al. Examining the effects of extremely low-frequency magnetic fields on cognitive functions and functional brain markers in aged mice. *Scientific Reports*. 2025;15(1):8365. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93230-y>
 19. Nelson JF, Felicio LS, Randall PK, Sims C, Finch CE. A longitudinal study of estrous cyclicity in aging C57BL/6J mice: I. Cycle frequency, length and vaginal cytology. *Biology of Reproduction*. 1982;27(2):327–39. <https://doi.org/10.1095/biolreprod27.2.327>
 20. Алдибекова АЕ, Стяжкина ЕВ, Тряпицына ГА, Пряхин ЕА. Сравнение цитогенетических эффектов импульсного магнитного поля и гамма-излучения при воздействии на клетки меристемы проростков лука (*Allium cepa* L.). *Известия Российской академии наук. Серия биологическая*. 2024;51(1):3–13. Aldibekova AE, Styazhkina EV, Tryapitsyna GA, Pryakhin EA. Comparison of the cytogenetic effects of a pulsed magnetic field and gamma radiation on meristem cells of onion seed sprouts (*Allium cepa* L.). *Biology Bulletin*. 2024;51(1):3–13 (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S1026347024010012>
 21. Frame AK, Lone A, Harris RA, Cumming RC. Simple Protocol for distinguishing drug-induced effects on spatial memory acquisition, consolidation and retrieval in mice using the Morris water maze. *Bio Protocol*. 2019;9(18):e3376. <https://doi.org/10.21769/BioProtoc.3376>
 22. Vorhees CV, Williams MT. Morris water maze: procedures for assessing spatial and related forms of learning and memory. *Nature Protocols*. 2006;1(2):848–58. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.116>
 23. D'Hooge R, De Deyn PP. Applications of the Morris water maze in the study of learning and memory. *Brain Research Reviews*. 2001;36(1):60–90. [https://doi.org/10.1016/s0165-0173\(01\)00067-4](https://doi.org/10.1016/s0165-0173(01)00067-4)
 24. Kraeuter A-K, Guest PC, Sarnyai Z. The Open Field Test for measuring locomotor activity and anxiety-like behavior. In: Guest P, ed. *Pre-clinical models: techniques and protocols, methods in molecular biology*. New York: Humana Press; 2019. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8994-2_9
 25. De Coninck M, Van Dam D, Van Ginneken C, De Deyn P. Adapted Morris Water Maze protocol to prevent interference from confounding motor deficits on cognitive functioning. *Somatosensory & Motor Research*. 2017;34(3):172–8. <https://doi.org/10.1080/08990220.2017.1372740>
 26. Gouirand AM, Matuszewich L. The effects of chronic unpredictable stress on male rats in the water maze. *Physiology & Behavior*. 2005;86(1–2):21–31. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2005.06.027>
 27. Young ME, Hoane MR. Mixed effects modeling of Morris water maze data revisited: Bayesian censored regression. *Learning & Behavior*. 2021;49(3):307–20. <https://doi.org/10.3758/s13420-020-00457-y>
 28. Vorhees CV, Williams MT. Morris water maze: procedures for assessing spatial and related forms of learning and memory. *Nature Protocols*. 2006;1(2):848–58. <https://doi.org/10.1038/nprot.2006.116>
 29. Gallistel CR, Fairhurst S, Balsam P. The learning curve: implications of a quantitative analysis. *Proceedings of the National Academy of Science of USA*. 2004;101(36):13124–31. <https://doi.org/10.1073/pnas.0404965101>
 30. Зайцева НВ, Землянова МА, Игнатова АМ, Наймарк ОБ, Степанков МС. Возможности метода мультифрактального анализа для оценки перемещения биологических объектов. *Журнал общей биологии*. 2022;83(5):389–400. <https://doi.org/10.31857/S0044459622050098>
 31. Yan Y, Tian M, Wang T, Wang X, Wang Y, Shi J. Transcranial magnetic stimulation effects on cognitive enhancement in mild cognitive impairment and Alzheimer's disease: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Neurology*. 2023;14:42022345482. <https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1209205>
 32. Wang B, Wang Y, Yang F, Han F, Li K, Sun K, et al. The effect of repetitive transcranial magnetic stimulation on immediate and long-term cognitive functions in Alzheimer's dementia and mild cognitive impairment: a meta-analysis. *J NeuroEngineering Rehabil*. 2025;22(1):262. <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01777-8>
 33. Yang T, Liu W, He J, Gui Ch, Meng L, Xu L, Jia Ch. The cognitive effect of non-invasive brain stimulation combined with cognitive training in Alzheimer's disease and mild cognitive impairment: a systematic review and meta-analysis. *Alzheimers Research and Therapy*. 2024;16(1):140. <https://doi.org/10.1186/s13195-024-01505-9>
 34. Hendrickx JO, Moudt SD, Calus E, Deyn PP, Dam DV, Meyer G. Age-related cognitive decline in spatial learning and memory of C57BL/6J mice. *Behavioural Brain Research*. 2022;418:113649. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2021.113649>

Вклад авторов. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства критериям ICMJE. Наибольший вклад распределен следующим образом: Е.Е. Пряхин — проведение экспериментов, анализ данных, написание черновой версии рукописи; И.А. Шапошникова — планирование исследования, редактирование и подготовка итоговой версии рукописи.

Об авторах:

Пряхин Евгений Евгеньевич, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3732-1985>

Шапошникова Ирина Александровна, канд. биол. наук, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0769-8267>