

Журнал медико-биологических исследований. 2025. Т. 13, № 3. С. 363–378.
Journal of Medical and Biological Research, 2025, vol. 13, no. 3, pp. 363–378.



Обзорная статья
УДК 612.8:57.042
DOI: 10.37482/2687-1491-Z256

Эффекты воздействий электромагнитных полей радиочастотного и миллиметрового диапазонов на нервную систему: когнитивные процессы и психоэмоциональное состояние (обзор)

Наталья Игоревна Хорсева* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3444-0050>
Павел Евгеньевич Григорьев**/** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7390-9109>

*Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук
(Москва, Россия)

**Севастопольский государственный университет
(Севастополь, Россия)

***Академический научно-исследовательский институт физических методов лечения,
медицинской климатологии и реабилитации имени И.М. Сеченова
(Ялта, Республика Крым, Россия)

Аннотация. Данная статья является продолжением серии обзоров по изучению влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) на нервную систему молодых животных *in vitro* и *in vivo*¹. В первом обзоре рассмотрены изменение потенциала действия, проницаемости гематоэнцефалического барьера, морфологические трансформации клеток и миелиновой оболочки, а также материалы, указывающие на разнообразие подходов к изучению воздействия ЭМП РЧ. Во втором обзоре дан анализ морфогистологических изменений структур центральной нервной системы, в первую очередь гиппокампа, который участвует в формировании эмоций и пространственной памяти, необходимой для навигации, а также в консолидации памяти (переходе кратковременной в долговременную). Поскольку выявленные изменения в гиппокампе могут отразиться на когнитивных процессах и поведении, в настоящей статье

© Хорсева Н.И., Григорьев П.Е., 2025

Ответственный за переписку: Наталья Игоревна Хорсева, адрес: 119334, Москва, ул. Косыгина, д. 4;
e-mail: sheridan1957@mail.ru

¹ Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vitro* (обзор) // Журн. мед.-биол. исследований. 2024. Т. 12, № 2. С. 229–239. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z181>; Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vivo* (обзор) // Журн. мед.-биол. исследований. 2024. Т. 12, № 3. С. 383–398. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z195>

изучены экспериментальные данные, полученные с помощью поведенческих тестов, о влиянии ЭМП РЧ, Wi-Fi и 5G на когнитивные процессы и психоэмоциональное состояние молодых животных (крыс и мышей). Проанализированы методы изучения когнитивных процессов и психоэмоционального состояния у грызунов, а также изменения пространственной памяти, уровней тревожно-подобного поведения, страха, стресса и депрессивно-подобного поведения при воздействии ЭМП РЧ различных частотных диапазонов (от 900 МГц до 10 ГГц), Wi-Fi и 5G. Представленные результаты позволяют считать доказанным негативное влияние электромагнитных полей сотовой связи на нервную систему молодых животных и дать опосредованную оценку возможных негативных изменений в организме детей и подростков как самой уязвимой к любым факторам внешней среды части населения. Эти данные следует учитывать при разработке отдельных регламентов использования ЭМП РЧ для молодого населения и/или корректировке существующих стандартов в контексте возрастающего электромагнитного загрязнения.

Ключевые слова: электромагнитное поле радиочастотного диапазона, Wi-Fi, 5G, пространственная память, тревожность, тревожно-подобное поведение, депрессивно-подобное поведение, молодые животные

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (тема № 44.1, гос. № 0084-2019-004).

Благодарности. Данная публикация посвящена памяти Юрия Григорьевича Григорьева, выдающегося советского, российского ученого, крупнейшего специалиста в области радиобиологии, доктора медицинских наук, профессора, президента Российского национального комитета по защите от неионизирующей радиации, постоянного члена консультативного комитета Всемирной организации здравоохранения по международной программе «Электромагнитные поля и здоровье населения».

Для цитирования: Хорсева, Н. И. Эффекты воздействий электромагнитных полей радиочастотного и миллиметрового диапазонов на нервную систему: когнитивные процессы и психоэмоциональное состояние (обзор) / Н. И. Хорсева, П. Е. Григорьев // Журнал медико-биологических исследований. – 2025. – Т. 13, № 3. – С. 363-378. – DOI 10.37482/2687-1491-Z256.

Review article

Effects of Radiofrequency and Millimetre Range Electromagnetic Fields on the Nervous System: Cognitive Processes and Psycho-Emotional State (Review)

Natalia I. Khorseva* ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3444-0050>
Pavel E. Grigoriev**/** ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7390-9109>

*Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russia)

**Sevastopol State University
(Sevastopol, Russia)

***Sechenov Academic Research Institute of Physical Treatment Methods,
Medical Climatology and Rehabilitation
(Yalta, Republic of Crimea, Russia)

Corresponding author: Natalia Khorseva, address: ul. Kosygina 4, Moscow, 1119334, Russia;
e-mail: sheridan1957@mail.ru

Abstract. This paper is a continuation of a series of reviews of research into the effect of radiofrequency electromagnetic fields (RF EMF) on the nervous system of young animals *in vitro* and *in vivo*. The first review considered changes in the action potential and permeability of the blood–brain barrier, transformations in cell and myelin sheath morphology, as well as materials presenting various approaches to studying the effects of RF EMF. The second review analysed the morphological and histological changes in the central nervous system, primarily in the hippocampus, which is involved in the formation of emotions and spatial memory (necessary for navigation) as well as in the consolidation of information from short-term memory to long-term memory. Since the identified changes in the hippocampus can affect cognitive processes and behaviour, this paper examines experimental data obtained using behavioural tests looking into the effects of RF EMF, Wi-Fi and 5G on the cognitive processes and psycho-emotional state of young animals (rats and mice). The article analyses methods for studying cognitive processes and psycho-emotional state in rodents, as well as changes in spatial memory, levels of anxiety-like behaviour, fear, stress and depressive-like behaviour when exposed to RF EMF of various frequency ranges (from 900 MHz to 10 GHz), Wi-Fi and 5G. The presented results allow us to consider the adverse impact of cellular electromagnetic fields produced by cellular networks on the nervous system of young animals proven and to give an indirect assessment of possible negative changes in children and adolescents as the cohort most vulnerable to any environmental factors. These data should be taken into account when developing specific regulations for the use of RF EMF among the young population and/or adjusting the existing standards in the context of ever-increasing electromagnetic pollution.

Keywords: radiofrequency electromagnetic field, Wi-Fi, 5G, spatial memory, anxiety, anxiety-like behaviour, depressive-like behaviour, young animals

Funding. The study was funded within the framework of the state assignment of the Emanuel Institute of Biochemical Physics, Russian Academy of Sciences (topic no. 44.1, registration no. 0084-2019-004).

Acknowledgements. This article is dedicated to the memory of an outstanding Soviet and Russian scientist, leading specialist in the field of radiobiology, Doctor of Medical Sciences, Professor, President of Russian National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection, permanent member of the WHO Advisory Committee on the International Programme “Electromagnetic Fields and Public Health” Yury G. Grigoriev.

For citation: Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Effects of Radiofrequency and Millimetre Range Electromagnetic Fields on the Nervous System: Cognitive Processes and Psycho-Emotional State (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2025, vol. 13, no. 3, pp. 363–378. DOI: 10.37482/2687-1491-Z256

Доказано негативное воздействие электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) на структуры головного мозга, в частности на гиппокамп [1], который участвует в формировании эмоций и пространственной памяти, необходимой для навигации, а также в консолидации памяти (переходе кратковременной в долговременную). Следовательно, изменения в гиппокампе при воздействии ЭМП РЧ могут отразиться на когнитивных процессах и поведении.

Для оценки влияния факторов внешней среды на животных используются различные поведенческие тесты, стратегия выбора которых зависит от цели эксперимента [2, 3]. Оценка эффектов воздействия электромагнитного излучения различных радиочастотных диапазонов на когнитивные процессы и психоэмоциональное состояние не является исключением.

В настоящей публикации представлен анализ экспериментальных данных, полученных

с помощью поведенческих тестов, об изменениях когнитивных процессов и психоэмоционального состояния у молодых животных (крыс и мышей) при воздействии ЭМП РЧ разных частотных диапазонов, а также Wi-Fi и 5G. Это позволяет рассматривать данные результаты как модели, описывающие уже существующие изменения в познавательной и эмоциональной сферах у детей и подростков при воздействии ЭМП РЧ [4, 5].

Анализ основывался на материалах публикаций, взятых из открытых источников: <https://www.emf-portal.org>, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>, <https://cyberleninka.ru/>, <https://sci-hub.ru>, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/>, <http://scholar.google.com/>.

Методы изучения когнитивных процессов и психоэмоционального состояния у грызунов

В настоящее время существует достаточно большой арсенал тестов, с помощью которых можно оценить изменения параметров памяти, обучения, эмоционального состояния животных [2, 3, 6]. В частности, для регистрации рассматриваемых показателей применяются различные типы лабиринтов.

Подавляющее число исследований проводятся с помощью водного лабиринта Морриса [7–31]. Это объясняется тем, что данный поведенческий тест, являясь универсальным и эффективным способом изучения когнитивных функций у подопытных грызунов, позволяет применять протоколы, подходящие под разные задачи исследователей [32], хотя он и имеет некоторые недостатки. В частности, этот тест используется преимущественно в экспериментах с крысами, поскольку мыши плохо плавают, а также, по мнению некоторых авторов, сложно доказать, что регистрируемые изменения в поведении животных связаны именно с пространственной памятью [33]. Однако, на наш взгляд, последнее утверждение, сделанное в 1996 году, весьма сомнительно, поскольку с того времени сама

процедура претерпела значительные усовершенствования.

Используются также лабиринты с различной конфигурацией: радиальный с 8 рукавами (классический лабиринт) [13, 34], в т. ч. с применением видеоанализа [35, 36]; приподнятый крестообразный [9, 17, 19, 23, 28, 37]; Y- [34, 38] и Т-образный [39, 40]. Наряду с лабиринтами применяются и другие тесты: «открытое поле» [13, 19, 24, 34, 37, 39, 41, 42]; тесты пассивного избегания [34, 43]; «вращающийся стержень» [34]; местоположение объекта [23, 38]; ранее разработанный в статье [44] тест на доске с отверстиями [37]; тест на эпизодическую память [24] и даже авторские варианты (новый тест на распознавание объектов) [45]. Изменения эмоциональных состояний (депрессия, тревожность, страх, стресс, беспокойство) выявляются с использованием тестов: предпочтения сахарозы [19], подвешивания за хвост [19, 28, 42], вынужденного плавания [19, 39]. В некоторых исследованиях для оценки воздействия ЭМП РЧ на молодых животных применен не один метод, а их сочетание [9, 13, 17, 19, 28, 34, 38, 39, 42].

Далее будут описаны биологические эффекты воздействия ЭМП РЧ в широком частотном диапазоне (от 900 МГц до 10 ГГц), а также Wi-Fi и 5G, зарегистрированные с помощью арсенала тестов, перечисленных выше.

Изменение когнитивных процессов и поведения при воздействии ЭМП РЧ разной интенсивности и частоты

Проанализировано воздействие ЭМП РЧ в широком диапазоне частот при разных интенсивностях, за исключением эффектов от Wi-Fi и 5G, которые будут рассмотрены в соответствующем разделе.

Как видно из *таблицы* (см. с. 368–369), воздействие ЭМП РЧ различных частотных диапазонов с разной интенсивностью и длительностью в большинстве случаев приводило к ухудшению

пространственной памяти экспериментальных животных.

Интересен цикл работ Н. Wang et al., проведенных на крысах, где время экспозиции ЭМП РЧ составляло либо 5 и 6 мин/сут., либо только 6 мин/сут. в течение 6 нед. Исследования проводились для разных частотных диапазонов (и при их сочетанном воздействии), с разной интенсивностью. Кроме того, была проанализирована устойчивость полученных эффектов после окончания воздействия. Во всех исследованиях применялся водный лабиринт Морриса. Следует особо подчеркнуть, что и при этом кратковременном воздействии были зарегистрированы изменения в структурах гиппокампа [1]. Так, дисфункция пространственной памяти отмечена при 6-минутной экспозиции ЭМП РЧ для двух частот: 1,5 и 2,856 ГГц. В первом случае использовались три варианта плотности мощности микроволн: 5, 30 и 50 мВт/см² (SAR в мозге – 1,85; 11,1 и 18,5 Вт/кг соответственно). Была обнаружена прямая зависимость степени нарушения пространственной памяти от интенсивности воздействия, наибольшие изменения наблюдались в группе 50 мВт/см² (SAR = 18,5 Вт/кг). Статистически значимые изменения пространственной памяти сохранились в этой группе через 6 ч, 1 и 2 дня ($p < 0,01$) по сравнению с группами 5 и 30 мВт/см² [29]. Во втором случае также для трех групп (плотность мощности 5, 10 и 50 мВт/см²; SAR для головного мозга 3,5; 7 и 35 Вт/кг соответственно) эффект сохранялся через 6 ч, 1 и 3 дня после воздействия 10 и 50 мВт/см², более выраженным он был при 50 мВт/см² ($p < 0,01$) [10].

Аналогичный эффект обнаружен при однократном 5-минутном воздействии на частоте 2,856 ГГц (плотность мощности 30 мВт/см²; SAR для всего тела 14 Вт/кг), который, так же как и в исследовании [10], регистрировался через 1, 2, 3 и 7 дней после воздействия, более выраженный – на 2-е сутки ($p < 0,01$) [12].

Таким образом, острое воздействие ЭМП РЧ вызывает изменение пространственной памяти. Однако этот эффект, хотя и наблюдается

некоторое время после окончания воздействия, имеет ограниченную продолжительность последствий.

Нарушения пространственного обучения и памяти выявлены для 6-минутного воздействия в течение 6 нед. экспозиции ЭМП РЧ разных частот (2,45 и 2,856 ГГц) и разной плотности мощности у крыс. Воздействие 2,45 ГГц (6 мин, 3 раза в неделю в течение 6 нед.; плотность мощности 30 мВт/см², SAR для всего тела 15 Вт/кг) увеличивало задержку пробега во время навигационного теста ($p < 0,05$). Этот эффект сохранялся в течение 6 дней после окончания воздействия, за исключением 1-го и 4-го дня [22]. В отличие от воздействия 2,45 ГГц, использование частоты 2,856 ГГц (для 4 групп, выделенных по плотности мощности 5, 10, 20 и 30 мВт/см² (SAR не указан)) приводило к нарушению пространственного обучения и памяти во всех группах. Спустя 14 дней эффект сохранялся для всех групп, а через 28 дней – только для групп, испытавших влияние ЭМП РЧ с плотностью мощности 10, 20 и 30 мВт/см² ($p < 0,05$). Однако, так же как и для воздействия 2,45 ГГц, скорость плавания не изменялась на протяжении всего периода наблюдений [14].

Аналогичные результаты были получены в исследовании [20] при воздействии 2,856 ГГц в трех группах с плотностью мощности 2,5; 5 и 10 мВт/см² (SAR = 1,75; 3,5 и 7 Вт/кг соответственно). Однако выраженные изменения пространственного обучения и памяти были зарегистрированы только для группы 10 мВт/см² ($p < 0,05$). Эффект сохранялся через 7 дней, 1, 3 и 9 мес. после последнего воздействия.

Сравнение эффектов ЭМП двух частотных диапазонов – 2,856 и 9,375 ГГц – с плотностью мощности 10 мВт/см² (6 мин/сут., 5 дней в неделю, 6 нед.) выявило разные степени нарушений пространственного обучения и памяти. В частности, нарушения были зафиксированы на 5-й и 6-й день после последней экспозиции как для 2,756 ГГц ($p = 0,012$, $p = 0,045$ соответственно), так и для 9,375 ГГц ($p = 0,002$, $p = 0,005$ соответственно). Тем не менее более

Параметры ЭМП РЧ, при которых зафиксированы нарушения обучения и пространственной памяти у молодых крыс и мышей
RF EMF parameters and learning and spatial memory impairments in young rats and mice

Частота	Интенсивность воздействия	Длительность воздействия	Метод оценки	Особенности эффекта	Ссылка
<i>Крысы</i>					
900 МГц	SAR = $8,4738 \cdot 10^{-5}$ Вт/кг (все тело)	2 ч/сут., 5 дней в неделю, 30 дней	Приподнятый крестообразный лабиринт	Увеличение времени выполнения теста, в т. ч. поиска целевого квадрата ($p < 0,05$)	[9]
	SAR = 0,8 Вт/кг (мозг)	4 ч/сут., 15 дней	Открытое поле, водный лабиринт Морриса, классический тест в лабиринте	Значительное изменение поведения: увеличение тревожности, ухудшение обучения ($p < 0,05$)	[13]
	SAR = 0,231 Вт/кг (мозг), ППЭ = 7,737 мкВт/м ²	1, 2 и 4 ч/сут., 90 дней	Т-лабиринт	Наивысшая значимость изменений – при 4-часовом воздействии ($p < 0,001$)	[40]
	SAR = 1,15 Вт/кг (все тело), пиковая плотность 146,60 мкВт/см ²	1 ч/сут., 7 дней в неделю, 28 дней	Водный лабиринт Морриса	Наибольшие изменения – с 4-е по 6-е сут. ($p < 0,001$)	[15]
	SAR от 0,016 (все тело) до 2 Вт/кг (локально на голову)	3 ч/сут., 14 и 28 дней		Статистически значимые изменения после 28-дневного воздействия: частота пересечения платформы ($p < 0,05$) и процент времени, проведенного в целевом квадрате ($p < 0,001$)	[16]
916 МГц	ПТП = 10 Вт/м ²	6 ч/сут., 5 дней в неделю, 4–5 нед.	8-лучевой лабиринт	Статистически значимый эффект через 6 нед. ($p < 0,05$), но нормализация на 7–9-й неделе наблюдения	[35]
		6 ч/сут., 5 дней в неделю, 10 нед.		Нарушение пространственной памяти на 4–5-й неделе ($p < 0,05$), однако на 6–9-й неделе отсутствие отличий от контроля, т. е. полная адаптация к воздействию	[36]
GSM (900/ 1800 МГц)	Не указана	50 пропущенных звонков (интервал между звонками 15 с) в день, 4 нед.	Водный лабиринт Морриса	Уменьшение времени в целевом квадрате, увеличение времени для достижения целевого квадрата ($p < 0,05$)	[7]
		50 пропущенных звонков (длительность звонка 45 с) в день, 4 нед.	Тест пассивного избегания	Увеличение времени входа в темный отсек ($p < 0,05$)	[43]

2,1 ГГц	1-я группа: $E = 45 \text{ В/м}$, $\text{SAR} = 0,41 \text{ Вт/кг}$ (мозг) и $0,47 \text{ Вт/кг}$ (тело); 2-я группа: $E = 65 \text{ В/м}$, $\text{SAR} = 1,3 \text{ Вт/кг}$ (мозг) и $2,17 \text{ Вт/кг}$ (тело)	2 ч/сут., 1 нед.	Тест местоположения объекта, Y-образный лабиринт	[38] Более выраженное снижение для 2-й группы: локализация объекта и количества касаний ($p < 0,01$); общего времени исследования и частоты входа в новый рукав ($p < 0,001$)
900, 1800, 2450 МГц	$\text{SAR} = 5,953 \cdot 10^{-4}$ Вт/кг	2 ч/сут., 5 дней в неделю, 15 дней	Приподнятый крестообразный лабиринт, водный лабиринт Морриса	[17] Снижение когнитивных функций, при этом одинаковая выраженность этих изменений для всех примененных частотных диапазонов ($p < 0,05$)
<i>Мыши</i>				
900 МГц	$\text{SAR} = 0,41 - 0,98 \text{ Вт/кг}$	3 дня по 1 ч 55 мин, 1 день по 3 ч 45 мин (всего – 9 ч 30 мин за 4 дня)	Водный лабиринт Морриса	[8] Дефицит в консолидации и/или извлечении усвоенной пространственной информации ($p < 0,05$)
1,8 ГГц	SAR не указан	6 ч/сут., 4 нед.	Открытое поле, предпочтение сахарозы, подвешивание за хвост, приподнятый крестообразный лабиринт, принудительное плавание (использовали для анализа водного лабиринта Морриса)	[19] Отсутствие эффекта
2,856 ГГц	ППЭ = 8, 15, 30 и 50 мВт/см^2 , $\text{SAR} = 2,1; 3,9; 7,8$ и 13 Вт/кг (все тело) соответственно	30 мин (тестирование – за 1 день до воздействия, через 1 ч, 1 и 3 дня после воздействия)	Открытое поле	[41] Снижение внимания через 1 сут. после воздействия 8, 15, 30 и 50 мВт/см^2 , однако сохранение эффекта через 3 сут. – только для 50 мВт/см^2 ($p < 0,001$)
10 ГГц	ППЭ = $0,25 \text{ мВт/см}^2$, $\text{SAR} = 0,1790 \text{ Вт/кг}$ (тело)	2 ч/сут., 30 дней	Водный лабиринт Морриса	[11] Более высокая средняя задержка достижения целевого квадранта ($p < 0,05$)
	ППЭ = $0,25 \text{ мВт/см}^2$, $\text{SAR} = 0,1790 \text{ Вт/кг}$ (тело)	2 ч/сут., 15 дней		[18] Снижение пространственной памяти при определении положения платформы ($p < 0,001$)

Примечание: SAR (англ. specific absorption rate) – удельный коэффициент поглощения; ППЭ – плотность потока энергии; ПТП – плотность теплового потока; E – напряженность электрического поля.

выраженные статистически значимые изменения пространственной памяти выявлены при воздействии 9,375 ГГц. Однако скорость плавания в целевом квадранте и количество пересечений платформы в тесте были одинаковы в обеих группах крыс [27]. Таким образом, увеличение длительности экспозиции ЭМП РЧ удлиняет эффект последствия.

В работах [21, 25–27] изучалось сочетанное воздействие ЭМП двух частот (2,856 и 1,5 ГГц; 1,5 и 4,3 ГГц) при однократной 6-минутной экспозиции. Все исследования проводились по одинаковой схеме: оценивались изменения пространственной памяти, скорости перемещения и пересечений платформы в тесте для каждой частоты отдельно и при их сочетанном последовательном воздействии (сначала одной, а затем другой частоты). Кроме того, определялась устойчивость полученных изменений после окончания экспозиции.

Оценка сочетанного воздействия 2,856 и 1,5 ГГц представлена в двух работах S. Tap et al. [21, 25]. В первом исследовании воздействие ЭМП РЧ проводилось с плотностью мощности 5 и 10 мВт/см² для каждой частоты отдельно и при их сочетании. Нарушение пространственной памяти зарегистрировано для всех вариантов, но значимые изменения выявлены через 1, 2, 7, 14 и 28 дней после воздействия с плотностью мощности 10 мВт/см² ($p = 0,005$; $p = 0,012$; $p = 0,007$; $p = 0,018$ и $p = 0,022$ соответственно). Тем не менее попарное сравнение всех вариантов воздействий и степени нарушения пространственной памяти позволило авторам сделать вывод, что частотно-зависимый эффект отсутствует, а микроволново-индуцированное снижение когнитивных функций во многом определяется силой ЭМП, а не частотой [21]. Поэтому во втором исследовании плотность мощности составляла 10 мВт/см². Значимое ухудшение пространственной памяти было выявлено только при сочетании двух частот через 6 ч после воздействия (последовательная экспозиция: сначала 2,856 ГГц, а затем 1,5 ГГц) ($p = 0,001$) [25].

Сочетанное влияние ЭМП других частотных диапазонов (1,5 и 4,3 ГГц; плотность мощности 10 мВт/см²) изучено в работе [26] (SAR для 1,5 ГГц – 3,7 Вт/кг; для 4,3 ГГц – 3,3 Вт/кг; и для сочетанного воздействия – 7 (3,3+3,7) Вт/кг. ЭМП РЧ вызывало изменение пространственной памяти: при 4,3 ГГц – через 1 день после воздействия ($p = 0,035$), а при 1,5 ГГц – через 1 и 2 дня ($p = 0,003$, $p = 0,012$ соответственно). При сочетанном воздействии происходило более длительное нарушение показателя – через 1, 2, 3 и 7 дней ($p = 0,003$; $p = 0,012$; $p = 0,013$ и $p = 0,032$ соответственно). Авторы делают вывод, что эффекты негативного влияния на пространственную память варьируются в зависимости от частоты микроволнового излучения.

Похожие результаты были получены в работе [27] при SAR для 1,5 ГГц – 3,3 Вт/кг; для 4,3 ГГц – 2,5 Вт/кг; для сочетанного воздействия – 5,8 Вт/кг. Во всех вариантах опыта выявлено нарушение пространственной памяти, однако оно было наиболее выраженным при 1,5 ГГц. Одновременное микроволновое воздействие приводило к более серьезным нарушениям пространственной памяти, чем воздействие одной микроволновой частоты, эффект которого выявлен через 1 и 3 дня после экспозиции ($p = 0,029$ и $p = 0,038$ соответственно). Тем не менее в отличие от данных исследования [26] сочетанное воздействие двух частот вызывало менее длительное нарушение. Не исключено, что такой эффект связан с разницей в расчете SAR (значение показателя было больше в работе [26]).

Следует особо отметить, что во всех экспериментах при 6-минутной экспозиции ЭМП РЧ в представленных частотных диапазонах и с разной плотностью мощности [10, 12, 14, 20–22, 24, 26, 27, 29, 30] изменений в скорости плавания и количестве пересечений платформы в тесте обнаружено не было, что указывает на отсутствие нарушений локомоторных способностей у экспериментальных групп. Таким образом, сочетанное микроволновое воздействие двух частот (2,856 и 1,5 ГГц; 1,5 и 4,3 ГГц) вы-

зывает более серьезные нарушения пространственной памяти, чем воздействие одной микроволновой частоты.

Эксперименты по сочетанному воздействию ЭМП разных частот, на наш взгляд, могут служить имитацией влияния сотовых вышек, где предполагаются несколько источников, создавая сложный частотный спектр.

Изменение когнитивных процессов при воздействии Wi-Fi и 5G

Сегодня уже можно констатировать, что негативное действие ЭМП РЧ зарегистрировано на всех уровнях – от молекулярного до целостного организма. В настоящее время проблема воздействия Wi-Fi и 5G особенно актуальна в связи с активным и повсеместным использованием данных технологий. Однако до сих пор продолжается дискуссия о полученных результатах, особенно в отношении эффектов Wi-Fi, поскольку исследования его влияния на когнитивные процессы и поведение единичны, а установленные эффекты неоднозначны.

Особое внимание следует обратить на обзор Т.А. Attah et al., где суммированы результаты экспериментальных исследований воздействия Wi-Fi на крыс и представлен широкий спектр выявленных эффектов, включая изменение поведения и когнитивных процессов [46].

Нарушение пространственной памяти крыс было зарегистрировано при действии 2,45 ГГц: по 4 ч/сут. в течение 45 дней (7,88 Вт/м²) (увеличение времени задержки для достижения цели как в фазе обучения, так и в фазе тестирования ($p < 0,05$ и $p < 0,01$ соответственно)) [23], по 1 ч/сут. в течение 28 дней ($p < 0,05$) [37] и при постоянном воздействии (24 ч/сут. в течение 6 мес.; $p < 0,05$) [23]. Однако у мышей при постоянном воздействии в течение 36 дней с разной удаленностью от источника Wi-Fi (0,5 и 1 м) не выявлено значимых нарушений пространственной памяти ($p > 0,05$) [39].

В 2020 году в прессе появилось сообщение, что специалисты Научно-исследовательского

института медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова дали заключение о безопасности воздействия электромагнитных полей, создаваемых технологиями 5G². Вместе с тем в исследованиях других авторов установлено, что воздействие 2,65 ГГц на мышей в течение 28 дней по 4 ч/сут. вызывало незначительное ухудшение пространственной памяти ($p > 0,05$), однако оно не являлось статистически значимым, а воздействие 4,9 ГГц (1 ч/сут. на протяжении 21 дня) – не изменяло ее параметры [28]. Зарегистрированы и другие изменения, которые будут рассмотрены в следующем разделе.

Изучение воздействия 2,4 ГГц на когнитивные функции крыс разных возрастных групп (ювенильные, взрослые, пресенильные) не выявило статистически значимых различий между опытными и контрольными группами. Тем не менее было установлено, что ювенильные крысы обучались быстрее, чем пресенильные, при этом память у взрослых и пресенильных животных сохранялась лучше, однако у них был ниже эффект пассивного плавания [31].

Как показано выше, единичные работы указывают на возможность изменений в протекании когнитивных процессов под влиянием Wi-Fi и 5G. Следовательно, вопрос о негативных последствиях данного влияния требует продолжения исследований, которые следует проводить при круглосуточном воздействии с разными сроками экспозиции. Именно такой подход будет более приближен к современным реалиям, в частности к повсеместному использованию Wi-Fi. При изучении воздействия 5G необходим аналогичный подход, поскольку его критическими мишенями являются кожа и склера глаз.

Психоэмоциональные состояния при действии ЭМП РЧ, Wi-Fi и 5G

Анализ литературы показал, что воздействие ЭМП РЧ, Wi-Fi и 5G наряду с нарушениями пространственной памяти обуславливает изменения психоэмоционального состояния. Нередко вторые наблюдались при отсутствии первых.

²Проверено: 5G безвреден // Новостной портал «Московский комсомолец». URL: <https://www.mk.ru/social/2021/01/28/provereno-5g-bezvreden.html?ysclid=mf6p93ijj3703795426> (дата обращения: 18.09.2025).

Так, увеличение уровня тревожности зарегистрировано в случае воздействия 900 МГц при разных экспозициях: 4 ч/сут. в течение 15 дней (SAR для мозга – 0,231 Вт/кг; $p < 0,05$) [13]; 2 ч/сут. по 5 дней в неделю в течение 30 дней ($p < 0,05$) [9]. Аналогичные эффекты были получены при воздействии 1,8 ГГц (по 6 ч/сут. на протяжении 4 нед.; $p < 0,05$) [19].

Изменения в поведении животных, отражающие развитие депрессивного состояния, были установлены при круглосуточном воздействии Wi-Fi (2,4 и 5 ГГц) в течение 36 дней (эффект зарегистрирован на 25-й день; $p < 0,05$) [39] и при экспозиции ЭМП частотой 4,9 ГГц (5G) по 1 ч/сут. в течение 21 дня ($p < 0,05$) [42]. Однако при воздействии 1,8 ГГц (4 нед. по 6 ч/сут.) [19], при 30-минутном воздействии 2,856 ГГц [41], а также при более длительной экспозиции 2,64 ГГц (5G) (28 дней по 4 ч/сут.) [28] депрессивно-подобное поведение не обнаружено.

Тревожно-подобное поведение зафиксировано при 30-минутном воздействии 2,856 ГГц ($p < 0,05$) [41], при более длительной экспозиции 2,64 ГГц (5G) (28 дней по 4 ч/сут.; $p < 0,05$) [28], а также при воздействии Wi-Fi на частоте 2450 МГц на протяжении 28 дней по 1 ч/сут. ($p < 0,05$) [37] и 45 дней по 4 ч/сут. ($p < 0,05$) [23]. Однако экспозиция 4,9 ГГц (5G) по 1 ч/сут. (21 день) не оказывала влияния на тревожно-подобное поведение у мышей [42].

Достоверный рост уровня стресса выявлен при действии Wi-Fi (2,4 и 5 ГГц) на протяжении 36 дней (24 ч/сут., $p < 0,05$) [39], а круглосуточное воздействие Wi-Fi в течение 6 мес.

вызывало увеличение уровня беспокойства и страха у экспериментальных животных ($p < 0,05$) [24].

Таким образом, можно констатировать, что ЭМП РЧ не только вызывают нарушение когнитивных процессов, но и влияют на психоэмоциональное состояние.

Заключение

Результаты исследований, представленных в данном обзоре, позволяют сделать вывод, что воздействие ЭМП РЧ разных частотных диапазонов (от 900 МГц до 10 ГГц), Wi-Fi и 5G в большинстве случаев вызывает нарушение пространственной памяти и способствует увеличению уровней тревожности (тревожно-подобного поведения), страха, стресса и депрессии (депрессивно-подобного поведения). Полученные данные могут быть спроецированы на детей и подростков, поэтому их необходимо учитывать при разработке отдельных регламентов использования ЭМП РЧ для данных групп населения и/или корректировке существующих стандартов.

Проблема воздействия ЭМП РЧ, Wi-Fi и 5G по-прежнему является актуальной и требует решения, поскольку результаты многочисленных исследований демонстрируют, что пределы воздействия, изложенные в документах Federal Communications Commission и International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, недостаточно строгие [47], а это предопределяет необходимость кардинального обновления как международных рекомендаций [48], так и отечественных нормативных актов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vivo* (обзор) // Журн. мед.-биол. исслед. 2024. Т. 12, № 3. С. 383–398. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z195>
2. Амикишиева А.В. Поведенческое фенотипирование: современные методы и оборудование // Информ. вестн. ВОГиС. 2009. Т. 13, № 3. С. 529–542.
3. Беляков В.И., Громова Д.С., Попова Н.Р., Мякишева Ю.В. Современные методы изучения поведения грызунов в модельных биомедицинских исследованиях (обзор проблемы) // Современ. вопр. биомедицины. 2022. Т. 6, № 4(21). Ст. № 1. https://doi.org/10.51871/2588-0500_2022_06_04_1
4. Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. Электромагнитные поля сотовой связи как фактор риска для здоровья детей и подростков (обзор) // Анализ риска здоровью. 2023. № 2. С. 186–193. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.18>
5. Хорсева Н.И., Григорьев П.Е. К оценке риска негативного воздействия электромагнитных полей сотовой связи на центральную нервную систему детей и подростков (обзор). Часть 2. Параметры когнитивных процессов // Анализ риска здоровью. 2024. № 3. С. 146–154. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.15>
6. Lai Y.-F., Wang H.-Y., Peng R.-Y. Establishment of Injury Models in Studies of Biological Effects Induced by Microwave Radiation // *Mil. Med. Res.* 2021. Vol. 8, № 1. Art. № 12. <https://doi.org/10.1186/s40779-021-00303-w>
7. Narayanan S.N., Kumar R.S., Potu B.K., Nayak S., Mailankot M. Spatial Memory Performance of Wistar Rats Exposed to Mobile Phone // *Clinics (Sao Paulo)*. 2009. Vol. 64, № 3. P. 231–234. <https://doi.org/10.1590/s1807-59322009000300014>
8. Fragopoulou A.F., Miltiadous P., Stamatakis A., Stylianopoulou F., Koussoulakos S.L., Margaritis L.H. Whole Body Exposure with GSM 900MHz Affects Spatial Memory in Mice // *Pathophysiology*. 2010. Vol. 17, № 3. P. 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.11.002>
9. Deshmukh P.S., Banerjee B.D., Abegaonkar M.P., Megha K., Ahmed R.S., Tripathi A.K., Mediratta P.K. Effect of Low Level Microwave Radiation Exposure on Cognitive Function and Oxidative Stress in Rats // *Indian J. Biochem. Biophys.* 2013. Vol. 50, № 2. P. 114–119.
10. Wang H., Peng R., Zhou H., Wang S., Gao Y., Wang L., Yong Z., Zuo H., Zhao L., Dong J., Xu X., Su Z. Impairment of Long-Term Potentiation Induction Is Essential for the Disruption of Spatial Memory After Microwave Exposure // *Int. J. Radiat. Biol.* 2013. Vol. 89, № 12. P. 1100–1107. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.817701>
11. Sharma A., Sisodia R., Bhatnagar D., Saxena V.K. Spatial Memory and Learning Performance and Its Relationship to Protein Synthesis of Swiss Albino Mice Exposed to 10 GHz Microwaves // *Int. J. Radiat. Biol.* 2014. Vol. 90, № 1. P. 29–35. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.835883>
12. Qiao S., Peng R., Yan H., Gao Y., Wang C., Wang S., Zou Y., Xu X., Zhao L., Dong J., Su Z., Feng X., Wang L., Hu X. Reduction of Phosphorylated Synapsin I (ser-553) Leads to Spatial Memory Impairment by Attenuating GABA Release After Microwave Exposure in Wistar Rats // *PLoS One*. 2014. Vol. 9, № 4. Art. № e95503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095503>
13. Saikhedkar N., Bhatnagar M., Jain A., Sukhwai P., Sharma C., Jaiswal N. Effects of Mobile Phone Radiation (900 MHz Radiofrequency) on Structure and Functions of Rat Brain // *Neurol. Res.* 2014. Vol. 36, № 12. P. 1072–1079. <https://doi.org/10.1179/1743132814y.00000000392>
14. Li H.-J., Peng R.-Y., Wang C.-Z., Qiao S.-M., Yong Z., Gao Y.-B., Xu X.-P., Wang S.-X., Dong J., Zuo H.-Y., Li Z., Zhou H.-M., Wang L.-F., Hu X.-J. Alterations of Cognitive Function and 5-HT System in Rats After Long Term Microwave Exposure // *Physiol. Behav.* 2015. Vol. 140. P. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2014.12.039>
15. Narayanan S.N., Kumar R.S., Karun K.M., Nayak S.B., Bhat P.G. Possible Cause for Altered Spatial Cognition of Prepubescent Rats Exposed to Chronic Radiofrequency Electromagnetic Radiation // *Metab. Brain Dis.* 2015. Vol. 30, № 5. P. 1193–1206. <https://doi.org/10.1007/s11011-015-9689-6>
16. Tang J., Zhang Y., Yang L., Chen Q., Tan L., Zuo S., Feng H., Chen Z., Zhu G. Exposure to 900 MHz Electromagnetic Fields Activates the mep-1/ERK Pathway and Causes Blood-Brain Barrier Damage and Cognitive Impairment in Rats // *Brain Res.* 2015. Vol. 1601. P. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.01.019>
17. Deshmukh P.S., Megha K., Nasare N., Banerjee B.D., Ahmed R.S., Abegaonkar M.P., Tripathi A.K., Mediratta P.K. Effect of Low Level Subchronic Microwave Radiation on Rat Brain // *Biomed. Environ. Sci.* 2016. Vol. 29, № 12. P. 858–867. <https://doi.org/10.3967/bes2016.115>

18. Sharma A., Kesari K.K., Saxena V.K., Sisodia R. Ten Gigahertz Microwave Radiation Impairs Spatial Memory, Enzymes Activity, and Histopathology of Developing Mice Brain // *Mol. Cell. Biochem.* 2017. Vol. 435, № 1–2. P. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11010-017-3051-8>
19. Zhang J.-P., Zhang K.-Y., Guo L., Chen Q.-L., Gao P., Wang T., Li J., Guo G.-Z., Ding G.-R. Effects of 1.8 GHz Radiofrequency Fields on the Emotional Behavior and Spatial Memory of Adolescent Mice // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2017. Vol. 14, № 11. Art. № 1344. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111344>
20. Wang H., Tan S., Xu X., Zhao L., Zhang J., Yao B., Gao Y., Zhou H., Peng R. Long Term Impairment of Cognitive Functions and Alterations of NMDAR Subunits After Continuous Microwave Exposure // *Physiol. Behav.* 2017. Vol. 181. P. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.08.022>
21. Tan S., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Zhou H., Gao Y., Peng R. Study on Dose-Dependent, Frequency-Dependent, and Accumulative Effects of 1.5 GHz and 2.856 GHz Microwave on Cognitive Functions in Wistar Rats // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7, № 1. Art. № 10781. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11420-9>
22. Zhi W.-J., Peng R.-Y., Li H.-J., Zou Y., Yao B.-W., Wang C.-Z., Liu Z.-H., Gao X.-H., Xu X.-P., Dong J., Zhao L., Zhou H.-M., Wang L.-F., Hu X.-J. Microwave Radiation Leading to Shrinkage of Dendritic Spines in Hippocampal Neurons Mediated by SNK–SPAR Pathway // *Brain Res.* 2018. Vol. 1679. P. 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.11.020>
23. Varghese R., Majumdar A., Kumar G., Shukla A. Rats Exposed to 2.45 GHz of Non-Ionizing Radiation Exhibit Behavioral Changes with Increased Brain Expression of Apoptotic Caspase 3 // *Pathophysiology.* 2018. Vol. 25, № 1. P. 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2017.11.001>
24. Sharaf N.E., Galal A.F., El-Sawy M.S., Shalby A.B., Sayed A.H., Ahmed H.H. Role of Designed Bio-Geometrical Forms in Antagonizing Neurobehavioral Burden of Wi-Fi Radiation: Evidence-Based Experimental Study // *Biomed. Pharmacol. J.* 2019. Vol. 12, № 3. <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/1751>
25. Tan S., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Hao Y., Zhou H., Gao Y., Peng R. Acute Effects of 2.856 GHz and 1.5 GHz Microwaves on Spatial Memory Abilities and CREB-Related Pathways // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11, № 1. Art. № 12348. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91622-4>
26. Zhu R., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Zhou H., Gao Y., Peng R. Effects of 1.5 and 4.3 GHz Microwave Radiation on Cognitive Function and Hippocampal Tissue Structure in Wistar Rats // *Sci. Rep.* 2021. Vol. 11, № 1. Art. № 10061. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89348-4>
27. Wang H., Liu Y., Sun Y., Zhao L., Dong J., Xu X., Wang H., Zhang J., Yao B., Zhao X., Liu S., Zhang K., Peng R. Changes in Rat Spatial Learning and Memory as Well as Serum Exosome Proteins After Simultaneous Exposure to 1.5 GHz and 4.3 GHz Microwaves // *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 2022. Vol. 243. Art. № 113983. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113983>
28. Zheng R., Zhang X., Gao Y., Gao D., Gong W., Zhang C., Dong G., Li Z. Biological Effects of Exposure to 2650 MHz Electromagnetic Radiation on the Behavior, Learning, and Memory of Mice // *Brain Behav.* 2023. Vol. 13, № 6. Art. № e3004. <https://doi.org/10.1002/brb3.3004>
29. Wang H., Song L., Zhao L., Wang H., Xu X., Dong J., Zhang J., Yao B., Zhao X., Peng R. The Dose-Dependent Effect of 1.5-GHz Microwave Exposure on Spatial Memory and the NMDAR Pathway in Wistar Rats // *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023. Vol. 30, № 13. P. 37427–37439. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24850-4>
30. Wang H., Liu Y., Sun Y., Dong J., Xu X., Wang H., Zhao X., Zhang J., Yao B., Zhao L., Liu S., Peng R. Changes in Cognitive Function, Synaptic Structure and Protein Expression After Long-Term Exposure to 2.856 and 9.375 GHz Microwaves // *Cell Commun. Signal.* 2023. Vol. 21. Art. № 34. <https://doi.org/10.1186/s12964-022-01011-1>
31. Krivova N.A., Kudabaeva M.S., Zaeva O.B., Borodina S.V., Lepekhina T.B., Pavlenko O.A., Makhmanazarov R.M., Kokin D.S., Shipilov S.E. The Effect of Exposure to RF-EMF from the Laboratory Simulator of 5G NR Base Station on Physiological Parameters and Cognitive Abilities of Male Wistar Rats of Different Ages // *Sci. Rep.* 2024. Vol. 14, № 1. Art. № 10283. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60862-5>
32. Чернюк Д.П., Большакова А.В., Власова О.Л., Безпрозванный И.Б. Возможности и перспективы поведенческого теста «Водный лабиринт Морриса» // *Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова.* 2021. Т. 107, № 3. С. 267–287. <https://doi.org/10.31857/S0869813921030043>
33. Иптышев А.М., Горина Я.В., Лопатина О.Л., Комлева Ю.К., Черных А.И., Белова О.А., Салмина А.Б. Сравнение тестов «Восьмирукавный радиальный лабиринт» и «Водный лабиринт Морриса» при оценке пространственной памяти у экспериментальных животных в ходе нейроповеденческого тестирования // *Фундам. и клин. медицина.* 2017. Т. 2, № 2. С. 62–69.

34. Keleş A.İ., Yıldırım M., Gedikli Ö., Çolakoğlu S., Kaya H., Baş O., Sönmez O.F., Odacı E. The Effects of a Continuous 1-h a Day 900-MHz Electromagnetic Field Applied Throughout Early and Mid-Adolescence on Hippocampus Morphology and Learning Behavior in Late Adolescent Male Rats // *J. Chem. Neuroanat.* 2018. Vol. 94. P. 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2018.08.006>
35. Hao D., Yang L., Chen S., Tian Y., Wu S. 916 MHz Electromagnetic Field Exposure Affects Rat Behavior and Hippocampal Neuronal Discharge // *Neural Regen. Res.* 2012. Vol. 7, № 19. P. 1488–1492. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5374.2012.19.007>
36. Hao D., Yang L., Chen S., Tong J., Tian Y., Su B., Wu S., Zeng Y. Effects of Long-Term Electromagnetic Field Exposure on Spatial Learning and Memory in Rats // *Neurol. Sci.* 2013. Vol. 34, № 2. P. 157–164. <https://doi.org/10.1007/s10072-012-0970-8>
37. Gupta S.K., Patel S.K., Tomar M.S., Singh S.K., Mesharam M.K., Krishnamurthy S. Long-Term Exposure of 2450 MHz Electromagnetic Radiation Induces Stress and Anxiety Like Behavior in Rats // *Neurochem. Int.* 2019. Vol. 128. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2019.04.001>
38. Gökçek-Saraç Ç., Akçay G., Karakurt S., Ateş K., Özen Ş., Derin N. Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats // *Electromagn. Biol. Med.* 2021. Vol. 40, № 1. P. 179–190. <https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1851251>
39. Зибарев Е.В., Афанасьев А.С., Слюсарева О.В., Булавина И.Д. Исследования влияния Wi-Fi оборудования на организм лабораторных животных // *Гигиена и санитария.* 2017. Т. 96, № 7. С. 661–664. <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-661-664>
40. Sharma S., Shukla S. Effect of Electromagnetic Radiation on Redox Status, Acetylcholine Esterase Activity and Cellular Damage Contributing to the Diminution of the Brain Working Memory in Rats // *J. Chem. Neuroanat.* 2020. Vol. 106. Art. № 101784. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2020.101784>
41. Jiang S., Ma Y., Shi Y., Zou Y., Yang Z., Zhi W., Zhao Z., Shen W., Chen L., Wu Y., Wang L., Hu X., Wu H. Acute Exposure of Microwave Impairs Attention Process by Activating Microglial Inflammation // *Cell Biosci.* 2024. Vol. 14, № 1. Art. № 2. <https://doi.org/10.1186/s13578-023-01162-9>
42. Qin T.-Z., Wang X., Du J.-Z., Lin J.-J., Xue Y.-Z., Guo L., Lai P.-P., Jing Y.-T., Zhang Z.-W., Ding G.-R. Effects of Radiofrequency Field from 5G Communications on the Spatial Memory and Emotionality in Mice // *Int. J. Environ. Health Res.* 2024. Vol. 34, № 1. P. 316–327. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2149708>
43. Narayanan S.N., Kumar R.S., Potu B.K., Nayak S., Bhat P.G., Mailankot M. Effect of Radio-Frequency Electromagnetic Radiations (RF-EMR) on Passive Avoidance Behaviour and Hippocampal Morphology in Wistar Rats // *Ups. J. Med. Sci.* 2010. Vol. 115, № 2. P. 91–96. <https://doi.org/10.3109/03009730903552661>
44. Murai T., Okuda S., Tanaka T., Ohta H. Characteristics of Object Location Memory in Mice: Behavioral and Pharmacological Studies // *Physiol. Behav.* 2007. Vol. 90, № 1. P. 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.09.013>
45. Kim J.H., Chung K.H., Hwang Y.R., Park H.R., Kim H.J., Kim H.-G., Kim H.R. Exposure to RF-EMF Alters Postsynaptic Structure and Hinders Neurite Outgrowth in Developing Hippocampal Neurons of Early Postnatal Mice // *Int. J. Mol. Sci.* 2021. Vol. 22, № 10. Art. № 5340. <https://doi.org/10.3390/ijms22105340>
46. Attah T.A., Ayantunji B., Adamu A., Omede A., Leleji J., Hussiani S., Enemali J.-P., Suleiman Z.I., Dumbiri C., Bwala I., Polok C. Biological Effects of High Radiofrequency Radiation on Wistar Rats: A Literature Review // *J. Public Health Int.* 2022. Vol. 5, № 2. P. 1–31. <https://doi.org/10.14302/issn.2641-4538.jphi-22-4197>
47. Belyaev I., Blackman C., Chamberlin K., DeSalles A., Dasdag S., Fernández C., Hardell L., Héroux P., Kelley E., Kesari K., Maisch D., Mallery-Blythe E., Melnick R.L., Miller A., Moskowitz J.M., Sun W., Yakymenko I. Scientific Evidence Invalidates Health Assumptions Underlying the FCC and ICNIRP Exposure Limit Determinations for Radiofrequency Radiation: Implications for 5G // *Environ. Health.* 2022. Vol. 21, № 1. Art. № 92. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>
48. Uche U.I., Naidenko O.V. Development of Health-Based Exposure Limits for Radiofrequency Radiation from Wireless Devices Using a Benchmark Dose Approach // *Environ. Health.* 2021. Vol. 20, № 1. Art. № 84. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00768-1>

References

1. Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Effects of Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. *In vivo* Experiments (Review). *J. Med. Biol. Res.*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 383–398. <https://doi.org/10.37482/2687-1491-Z195>
2. Amikishieva A.V. Povedencheskoe fenotipirovanie: sovremennye metody i oborudovanie [Behavioral Phenotyping: Up-to-Date Methods and Equipment]. *Informatsionnyy vestnik VOGiS*, 2009, vol. 13, no. 3, pp. 529–542.
3. Belyakov V.I., Gromova D.S., Popova N.R., Myakisheva Yu.V. Modern Methods for Studying Rodent Behavior in Model Biomedical Studies (Problem Review). *Mod. Iss. Biomed.*, 2022, vol. 6, no. 4. Art. no. 1 (in Russ.). https://doi.org/10.51871/2588-0500_2022_06_04_1
4. Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Electromagnetic Fields of Cellular Communication as a Health Risk Factor for Children and Adolescents (Review). *Health Risk Anal.*, 2023, no. 2, pp. 186–193. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2023.2.18.eng>
5. Khorseva N.I., Grigoriev P.E. Assessing the Risk of Negative Effects Produced by Electromagnetic Fields of Cellular Communication on the Central Nervous System of Children and Adolescents (Review). Part 2. Indicators of Cognitive Processes. *Health Risk Anal.*, 2024, no. 3, pp. 146–154. <https://doi.org/10.21668/health.risk/2024.3.15.eng>
6. Lai Y.-F., Wang H.-Y., Peng R.-Y. Establishment of Injury Models in Studies of Biological Effects Induced by Microwave Radiation. *Mil. Med. Res.*, 2021, vol. 8, no. 1. Art. no. 12. <https://doi.org/10.1186/s40779-021-00303-w>
7. Narayanan S.N., Kumar R.S., Potu B.K., Nayak S., Mailankot M. Spatial Memory Performance of Wistar Rats Exposed to Mobile Phone. *Clinics (Sao Paulo)*, 2009, vol. 64, no. 3, pp. 231–234. <https://doi.org/10.1590/s1807-59322009000300014>
8. Fragopoulou A.F., Miltiadous P., Stamatakis A., Stylianopoulou F., Koussoulakos S.L., Margaritis L.H. Whole Body Exposure with GSM 900MHz Affects Spatial Memory in Mice. *Pathophysiology*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 179–187. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2009.11.002>
9. Deshmukh P.S., Banerjee B.D., Abegaonkar M.P., Megha K., Ahmed R.S., Tripathi A.K., Mediratta P.K. Effect of Low Level Microwave Radiation Exposure on Cognitive Function and Oxidative Stress in Rats. *Indian J. Biochem. Biophys.*, 2013, vol. 50, no. 2, pp. 114–119.
10. Wang H., Peng R., Zhou H., Wang S., Gao Y., Wang L., Yong Z., Zuo H., Zhao L., Dong J., Xu X., Su Z. Impairment of Long-Term Potentiation Induction Is Essential for the Disruption of Spatial Memory After Microwave Exposure. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2013, vol. 89, no. 12, pp. 1100–1107. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.817701>
11. Sharma A., Sisodia R., Bhatnagar D., Saxena V.K. Spatial Memory and Learning Performance and Its Relationship to Protein Synthesis of Swiss Albino Mice Exposed to 10 GHz Microwaves. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2014, vol. 90, no. 1, pp. 29–35. <https://doi.org/10.3109/09553002.2013.835883>
12. Qiao S., Peng R., Yan H., Gao Y., Wang C., Wang S., Zou Y., Xu X., Zhao L., Dong J., Su Z., Feng X., Wang L., Hu X. Reduction of Phosphorylated Synapsin I (ser-553) Leads to Spatial Memory Impairment by Attenuating GABA Release After Microwave Exposure in Wistar Rats. *PLoS One*, 2014, vol. 9, no. 4. Art. no. e95503. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0095503>
13. Saikhedkar N., Bhatnagar M., Jain A., Sukhwal P., Sharma C., Jaiswal N. Effects of Mobile Phone Radiation (900 MHz Radiofrequency) on Structure and Functions of Rat Brain. *Neurol. Res.*, 2014, vol. 36, no. 12, pp. 1072–1079. <https://doi.org/10.1179/1743132814y.0000000392>
14. Li H.-J., Peng R.-Y., Wang C.-Z., Qiao S.-M., Yong Z., Gao Y.-B., Xu X.-P., Wang S.-X., Dong J., Zuo H.-Y., Li Z., Zhou H.-M., Wang L.-F., Hu X.-J. Alterations of Cognitive Function and 5-HT System in Rats After Long Term Microwave Exposure. *Physiol. Behav.*, 2015, vol. 140, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2014.12.039>
15. Narayanan S.N., Kumar R.S., Karun K.M., Nayak S.B., Bhat P.G. Possible Cause for Altered Spatial Cognition of Prepubescent Rats Exposed to Chronic Radiofrequency Electromagnetic Radiation. *Metab. Brain Dis.*, 2015, vol. 30, no. 5, pp. 1193–1206. <https://doi.org/10.1007/s11011-015-9689-6>
16. Tang J., Zhang Y., Yang L., Chen Q., Tan L., Zuo S., Feng H., Chen Z., Zhu G. Exposure to 900 MHz Electromagnetic Fields Activates the mkp-1/ERK Pathway and Causes Blood-Brain Barrier Damage and Cognitive Impairment in Rats. *Brain Res.*, 2015, vol. 1601, pp. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.01.019>
17. Deshmukh P.S., Megha K., Nasare N., Banerjee B.D., Ahmed R.S., Abegaonkar M.P., Tripathi A.K., Mediratta P.K. Effect of Low Level Subchronic Microwave Radiation on Rat Brain. *Biomed. Environ. Sci.*, 2016, vol. 29, no. 12, pp. 858–867. <https://doi.org/10.3967/bes2016.115>
18. Sharma A., Kesari K.K., Saxena V.K., Sisodia R. Ten Gigahertz Microwave Radiation Impairs Spatial Memory, Enzymes Activity, and Histopathology of Developing Mice Brain. *Mol. Cell. Biochem.*, 2017, vol. 435, no. 1–2, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1007/s11010-017-3051-8>

19. Zhang J.-P., Zhang K.-Y., Guo L., Chen Q.-L., Gao P., Wang T., Li J., Guo G.-Z., Ding G.-R. Effects of 1.8 GHz Radiofrequency Fields on the Emotional Behavior and Spatial Memory of Adolescent Mice. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2017, vol. 14, no. 11. Art. no. 1344. <https://doi.org/10.3390/ijerph14111344>
20. Wang H., Tan S., Xu X., Zhao L., Zhang J., Yao B., Gao Y., Zhou H., Peng R. Long Term Impairment of Cognitive Functions and Alterations of NMDAR Subunits After Continuous Microwave Exposure. *Physiol. Behav.*, 2017, vol. 181, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2017.08.022>
21. Tan S., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Zhou H., Gao Y., Peng R. Study on Dose-Dependent, Frequency-Dependent, and Accumulative Effects of 1.5 GHz and 2.856 GHz Microwave on Cognitive Functions in Wistar Rats. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7, no. 1. Art. no. 10781. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11420-9>
22. Zhi W.-J., Peng R.-Y., Li H.-J., Zou Y., Yao B.-W., Wang C.-Z., Liu Z.-H., Gao X.-H., Xu X.-P., Dong J., Zhao L., Zhou H.-M., Wang L.-F., Hu X.-J. Microwave Radiation Leading to Shrinkage of Dendritic Spines in Hippocampal Neurons Mediated by SNK–SPAR Pathway. *Brain Res.*, 2018, vol. 1679, pp. 134–143. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2017.11.020>
23. Varghese R., Majumdar A., Kumar G., Shukla A. Rats Exposed to 2.45 GHz of Non-Ionizing Radiation Exhibit Behavioral Changes with Increased Brain Expression of Apoptotic Caspase 3. *Pathophysiology*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.pathophys.2017.11.001>
24. Sharaf N.E., Galal A.F., El-Sawy M.S., Shalby A.B., Sayed A.H., Ahmed H.H. Role of Designed Bio-Geometrical Forms in Antagonizing Neurobehavioral Burden of Wi-Fi Radiation: Evidence-Based Experimental Study. *Biomed. Pharmacol. J.*, 2019, vol. 12, no. 3. <https://dx.doi.org/10.13005/bpj/1751>
25. Tan S., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Hao Y., Zhou H., Gao Y., Peng R. Acute Effects of 2.856 GHz and 1.5 GHz Microwaves on Spatial Memory Abilities and CREB-Related Pathways. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1. Art. no. 12348. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91622-4>
26. Zhu R., Wang H., Xu X., Zhao L., Zhang J., Dong J., Yao B., Wang H., Zhou H., Gao Y., Peng R. Effects of 1.5 and 4.3 GHz Microwave Radiation on Cognitive Function and Hippocampal Tissue Structure in Wistar Rats. *Sci. Rep.*, 2021, vol. 11, no. 1. Art. no. 10061. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89348-4>
27. Wang H., Liu Y., Sun Y., Zhao L., Dong J., Xu X., Wang H., Zhang J., Yao B., Zhao X., Liu S., Zhang K., Peng R. Changes in Rat Spatial Learning and Memory as Well as Serum Exosome Proteins After Simultaneous Exposure to 1.5 GHz and 4.3 GHz Microwaves. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 2022, vol. 243. Art. no. 113983. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2022.113983>
28. Zheng R., Zhang X., Gao Y., Gao D., Gong W., Zhang C., Dong G., Li Z. Biological Effects of Exposure to 2650 MHz Electromagnetic Radiation on the Behavior, Learning, and Memory of Mice. *Brain Behav.*, 2023, vol. 13, no. 6. Art. no. e3004. <https://doi.org/10.1002/brb3.3004>
29. Wang H., Song L., Zhao L., Wang H., Xu X., Dong J., Zhang J., Yao B., Zhao X., Peng R. The Dose-Dependent Effect of 1.5-GHz Microwave Exposure on Spatial Memory and the NMDAR Pathway in Wistar Rats. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2023, vol. 30, no. 13, pp. 37427–37439. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24850-4>
30. Wang H., Liu Y., Sun Y., Dong J., Xu X., Wang H., Zhao X., Zhang J., Yao B., Zhao L., Liu S., Peng R. Changes in Cognitive Function, Synaptic Structure and Protein Expression After Long-Term Exposure to 2.856 and 9.375 GHz Microwaves. *Cell Commun. Signal.*, 2023, vol. 21. Art. no. 34. <https://doi.org/10.1186/s12964-022-01011-1>
31. Krivova N.A., Kudabaeva M.S., Zaeva O.B., Borodina S.V., Lepekhina T.B., Pavlenko O.A., Makhmanazarov R.M., Kokin D.S., Shipilov S.E. The Effect of Exposure to RF-EMF from the Laboratory Simulator of 5G NR Base Station on Physiological Parameters and Cognitive Abilities of Male Wistar Rats of Different Ages. *Sci. Rep.*, 2024, vol. 14, no. 1. Art. no. 10283. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-60862-5>
32. Chernyuk D.P., Bol'shakova A.V., Vlasova O.L., Bezprozvanny I.B. Opportunities and Prospects of the Behavioral Test “Morris Water Maze”. *Russ. J. Physiol.*, 2021, vol. 107, no. 3, pp. 267–287 (in Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0869813921030043>
33. Iptyshev A.M., Gorina Ya.V., Lopatina O.L., Komleva Yu.K., Chernykh A.I., Belova O.A., Salmina A.B. Svravnenie testov “Vos'mirukavnyy radial'nyy labirint” i “Vodnyy labirint Morrisa” pri otsenke prostranstvennoy pamyati u eksperimental'nykh zhivotnykh v khode neyropovedencheskogo testirovaniya [Comparison of Radial Arm Maze and Morris Water Maze for Evaluation of Spatial Memory in Experimental Animals During Neurobehavioral Testing]. *Fundamental'naya i klinicheskaya meditsina*, 2017, vol. 2, no. 2, pp. 62–69.
34. Keleş A.İ., Yıldırım M., Gedikli Ö., Çolakoğlu S., Kaya H., Baş O., Sönmez O.F., Odacı E. The Effects of a Continuous 1-h a Day 900-MHz Electromagnetic Field Applied Throughout Early and Mid-Adolescence on Hippocampus Morphology and Learning Behavior in Late Adolescent Male Rats. *J. Chem. Neuroanat.*, 2018, vol. 94, pp. 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2018.08.006>

35. Hao D., Yang L., Chen S., Tian Y., Wu S. 916 MHz Electromagnetic Field Exposure Affects Rat Behavior and Hippocampal Neuronal Discharge. *Neural Regen. Res.*, 2012, vol. 7, no. 19, pp. 1488–1492. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-5374.2012.19.007>
36. Hao D., Yang L., Chen S., Tong J., Tian Y., Su B., Wu S., Zeng Y. Effects of Long-Term Electromagnetic Field Exposure on Spatial Learning and Memory in Rats. *Neurol. Sci.*, 2013, vol. 34, no. 2, pp. 157–164. <https://doi.org/10.1007/s10072-012-0970-8>
37. Gupta S.K., Patel S.K., Tomar M.S., Singh S.K., Mesharam M.K., Krishnamurthy S. Long-Term Exposure of 2450 MHz Electromagnetic Radiation Induces Stress and Anxiety Like Behavior in Rats. *Neurochem. Int.*, 2019, vol. 128, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2019.04.001>
38. Gökçek-Saraç Ç., Akçay G., Karakurt S., Ateş K., Özen Ş., Derin N. Possible Effects of Different Doses of 2.1 GHz Electromagnetic Radiation on Learning, and Hippocampal Levels of Cholinergic Biomarkers in Wistar Rats. *Electromagn. Biol. Med.*, 2021, vol. 40, no. 1, pp. 179–190. <https://doi.org/10.1080/15368378.2020.1851251>
39. Zibarev E.V., Afanasev A.S., Slusareva O.V., Bulavina I.D. Exploratory Studies of the Influence of Wireless Equipment on the Body of Laboratory Animals. *Hyg. Sanitation*, 2017, vol. 96, no. 7, pp. 661–664 (in Russ.). <http://dx.doi.org/10.18821/0016-9900-2017-96-7-661-664>
40. Sharma S., Shukla S. Effect of Electromagnetic Radiation on Redox Status, Acetylcholine Esterase Activity and Cellular Damage Contributing to the Diminution of the Brain Working Memory in Rats. *J. Chem. Neuroanat.*, 2020, vol. 106. Art. no. 101784. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2020.101784>
41. Jiang S., Ma Y., Shi Y., Zou Y., Yang Z., Zhi W., Zhao Z., Shen W., Chen L., Wu Y., Wang L., Hu X., Wu H. Acute Exposure of Microwave Impairs Attention Process by Activating Microglial Inflammation. *Cell Biosci.*, 2024, vol. 14, no. 1. Art. no. 2. <https://doi.org/10.1186/s13578-023-01162-9>
42. Qin T.-Z., Wang X., Du J.-Z., Lin J.-J., Xue Y.-Z., Guo L., Lai P.-P., Jing Y.-T., Zhang Z.-W., Ding G.-R. Effects of Radiofrequency Field from 5G Communications on the Spatial Memory and Emotionality in Mice. *Int. J. Environ. Health Res.*, 2024, vol. 34, no. 1, pp. 316–327. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2149708>
43. Narayanan S.N., Kumar R.S., Potu B.K., Nayak S., Bhat P.G., Mailankot M. Effect of Radio-Frequency Electromagnetic Radiations (RF-EMR) on Passive Avoidance Behaviour and Hippocampal Morphology in Wistar Rats. *Ups. J. Med. Sci.*, 2010, vol. 115, no. 2, pp. 91–96. <https://doi.org/10.3109/03009730903552661>
44. Murai T., Okuda S., Tanaka T., Ohta H. Characteristics of Object Location Memory in Mice: Behavioral and Pharmacological Studies. *Physiol. Behav.*, 2007, vol. 90, no. 1, pp. 116–124. <https://doi.org/10.1016/j.physbeh.2006.09.013>
45. Kim J.H., Chung K.H., Hwang Y.R., Park H.R., Kim H.J., Kim H.-G., Kim H.R. Exposure to RF-EMF Alters Postsynaptic Structure and Hinders Neurite Outgrowth in Developing Hippocampal Neurons of Early Postnatal Mice. *Int. J. Mol. Sci.*, 2021, vol. 22, no. 10. Art. no. 5340. <https://doi.org/10.3390/ijms22105340>
46. Attah T.A., Ayantunji B., Adamu A., Omede A., Leleji J., Hussiani S., Enemali J.-P., Suleiman Z.I., Dumbiri C., Bwala I., Polok C. Biological Effects of High Radiofrequency Radiation on Wistar Rats: A Literature Review. *J. Public Health Int.*, 2022, vol. 5, no. 2, pp. 1–31. <https://doi.org/10.14302/issn.2641-4538.jphi-22-4197>
47. Belyaev I., Blackman C., Chamberlin K., DeSalles A., Dasdag S., Fernández C., Hardell L., Héroux P., Kelley E., Kesari K., Maisch D., Mallery-Blythe E., Melnick R.L., Miller A., Moskowicz J.M., Sun W., Yakymenko I. Scientific Evidence Invalidates Health Assumptions Underlying the FCC and ICNIRP Exposure Limit Determinations for Radiofrequency Radiation: Implications for 5G. *Environ. Health*, 2022, vol. 21, no. 1. Art. no. 92. <https://doi.org/10.1186/s12940-022-00900-9>
48. Uche U.I., Naidenko O.V. Development of Health-Based Exposure Limits for Radiofrequency Radiation from Wireless Devices Using a Benchmark Dose Approach. *Environ. Health*, 2021, vol. 20, no. 1. Art. no. 84. <https://doi.org/10.1186/s12940-021-00768-1>

Поступила в редакцию 23.10.2024 / Одобрена после рецензирования 27.01.2025 / Принята к публикации 31.01.2025.
Submitted 23 October 2024 / Approved after reviewing 27 January 2025 / Accepted for publication 31 January 2025.