



Журнал медико-биологических исследований. 2024. Т. 12, № 2. С. 229–239.
Journal of Medical and Biological Research, 2024, vol. 12, no. 2, pp. 229–239.

Обзорная статья
УДК [612.8+537.531]:57.042
DOI: 10.37482/2687-1491-Z181

Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vitro* (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 им. И.М. Сеченова
(Ялта, Республика Крым, Россия)

Аннотация. Усиливающееся воздействие мобильной связи на население, в первую очередь на детей и подростков как на самую уязвимую к любым факторам внешней среды его часть, обуславливает необходимость скрупулезного изучения влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона на центральную нервную систему, которая является основной мишенью их действия. В связи с этим анализ экспериментальных данных в качестве опосредованной оценки возможных негативных изменений в организме молодых животных под воздействием электромагнитных полей радиочастотного диапазона, включая 5G и Wi-Fi, весьма актуален. Авторами статьи проведена систематизация экспериментальных данных, результаты которой будут представлены в двух частях: эксперименты *in vitro* и *in vivo*. В рамках данной публикации представлены материалы, указывающие как на разнообразие подходов к изучению воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона на центральную нервную систему, так и на трудности систематизации результатов экспериментов. Анализ литературных данных показал, что при всей многочисленности исследований воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона *in vitro* культуры клеток центральной нервной системы используются достаточно редко. Тем не менее в данном обзоре подробно рассмотрены результаты экспериментов *in vitro*: преобразование потенциала действия, морфологические трансформации клеток и миелиновой оболочки, изменение проницаемости гематоэнцефалического барьера (с использованием культур только нервных клеток). Установлено, что, несмотря на некоторую противоречивость полученных результатов, большинство исследований указывают на негативное влияние электромагнитных полей разных частотных диапазонов на клетки центральной нервной системы. Описание морфогистологических изменений структур центральной нервной системы при действии электромагнитных полей радиочастотного диапазона будет представлено в следующей части обзора.

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

Ключевые слова: электромагнитное поле радиочастотного диапазона, Wi-Fi, 5G, эксперименты *in vitro*, центральная нервная система, изолированные клетки нервной системы, миелиновая оболочка, гематоэнцефалический барьер

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

Благодарности. Данная публикация посвящена памяти 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» Юрия Григорьевича Григорьева.

Для цитирования: Хорсева, Н. И. Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vitro* (обзор) / Н. И. Хорсева, П. Е. Григорьев // Журн. мед.-биол. исследований. – 2024. – Т. 12, № 2. – С. 229-239. – DOI 10.37482/2687-1491-Z181.

Review article

Effects of Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. *In vitro* Experiments (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 Methods of Treatment,
Medical Climatology and Rehabilitation
(Yalta, Republic of Crimea, Russia)

Abstract. The effects of mobile communications on the population, primarily on children and adolescents as the cohort most vulnerable to any environmental factors, dictates the need for a thorough investigation into the impact of radio frequency electromagnetic fields (RF EMF) on the central nervous system (CNS) as the main target of their action. In this regard, the analysis of experimental data as an indirect assessment of possible negative changes in the body of young animals under the influence of RF EMF, including 5G and Wi-Fi, is highly relevant. We performed a systematization of experimental data, which will be presented in two parts: *in vitro* and *in vivo* experiments. This article introduces materials indicating both diversity of approaches to studying the effects of RF EMF on the central nervous system and difficulties of systematizing the results of the experiments. The analysis of literature data showed that, despite the numerous studies into the effects of RF EMF *in vitro*, CNS cell cultures are used rather rarely. However, this paper examines in detail the results of *in vitro* experiments: changes in the action potential, morphological changes in cells and the myelin sheath, and

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

changes in the permeability of the blood–brain barrier (using cultures of only nerve cells). It was established that, despite some inconsistency in the results obtained, most studies indicate a negative effect of RF EMF on CNS cells. The morphological and histological changes in CNS structures under the influence of RF EMF will be presented in the next part of the review.

Keywords: radio frequency electromagnetic field, Wi-Fi, 5G, *in vitro* experiments, central nervous system, isolated cells of the nervous system, myelin sheath, blood–brain barrier

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, reg. 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 Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. *In vitro* Experiments (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2024, vol. 12, no. 2, pp. 229–239. DOI: 10.37482/2687-1491-Z181

Вопросы негативного влияния устройств сотовой связи на организм человека приобретают большую актуальность вследствие увеличения числа пользователей, особенно среди детей и подростков, т. к. данные устройства являются источниками открытого и неконтролируемого электромагнитного излучения, а развивающийся организм, как известно, наиболее уязвим к воздействию любых факторов внешней среды [1, 2].

В настоящее время эта тема стала предметом многочисленных исследований, которые указывают на то, что электромагнитное поле радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) в первую очередь влияет на нервную систему, в частности на головной мозг и его структуры, тем более что современные гаджеты сотовой связи, как правило, подносятся к голове (уху).

История экспериментального изучения воздействия ЭМП РЧ на головной мозг подробно описана в [3, 4].

В настоящее время анализ биологических эффектов воздействия ЭМП РЧ рассматривается в ряде обзоров, в которых представлены анализ используемых объектов исследования [5], экспериментальные данные [5–10], оценка потенциальной угрозы при применении технологий Wi-Fi [11] и 5G [12–14], а также возмож-

ные механизмы воздействия на молекулярном уровне [8, 15].

Ряд авторов отмечают, что у современных ученых отсутствует системный подход, основанный на качестве экспериментальных методологий [10], а также согласованная модель животных со стандартизированными протоколами воздействия ЭМП РЧ и тестирования его влияния [16].

Встречаются и весьма неоднозначные подходы к анализу и систематизации материалов. Например, в обзоре [7], вышедшем в 2017 году, W.-J. Zhi et al. проанализировали «недавние исследования», где представлены работы за период с 1975 до 2017 года, и лишь 18 % из них были опубликованы в 2014–2017 годах. Неудивительно, что столь широкий временной разброс дает столь неоднозначные сведения о сопоставимости и воспроизводимости результатов.

Следует отметить, что большинство публикаций носят комплексный характер, поскольку в них представлены результаты исследования как морфологических, гистопатологических, биохимических изменений в структурах головного мозга при воздействии ЭМП РЧ, так и возможные молекулярные механизмы и изменения поведения.

В данной статье будут рассмотрены результаты экспериментальных исследований на культурах клеток нервной системы при воздействии ЭМП РЧ разных частотных диапазонов.

Анализ экспериментальных данных 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/>.

Воздействие ЭМП РЧ на клетки ЦНС *in vitro*. Как показал анализ литературы, на фоне многочисленных исследований биологических эффектов воздействия ЭМП РЧ использование культур клеток центральной нервной системы (ЦНС) встречается не столь часто. Это объясняется тем, что большинство экспериментов проведено на культурах раковых клеток, клетках крови, соединительной ткани и т. п. В рамках данной публикации они были исключены из дальнейшего рассмотрения.

Для изучения воздействия ЭМП РЧ на нервную систему в экспериментах *in vitro* используются культуры различных нервных и глиальных клеток: нейроны гиппокампа [17–19], полученные, в частности, из мозга мышей первого дня жизни [20]; нейриты эмбриональных нейрональных стволовых клеток [21, 22]; первично культивированные астроциты, микроглия и нейроны коры [23]; нервные стволовые клетки взрослых животных [24]; культура нейронов из эмбриональной коры крыс [25], а также ганглии пиявок [26, 27] и первичные астроциты головного мозга крысы (в качестве модели гематоэнцефалического барьера (ГЭБ)) [28].

Исследования проводились в широком частотном диапазоне: 900 МГц [24], 1800 МГц [17, 18, 21–23], импульсно-модулированные GSM и непрерывные ЭМП РЧ [25], 1850 МГц [20], 2,856 ГГц [28], 3,0 ГГц [19], миллиметровый диапазон (5G) [26, 27].

Изменения потенциала действия нейронов *in vitro* были зарегистрированы как при однократном 15-минутном воздействии импульсно-модулированных GSM и непрерыв-

ного РЧ-поля (изменение частоты всплесков спонтанной взрывной активности) [25], так и при 60-минутном влиянии 3,0 ГГц (снижение амплитуды потенциала действия и деполяризованного мембранного потенциала покоя нейронов с одновременным повышением возбудимости нейронов и синаптической передачи) [19]. Кроме того, показано, что однократное воздействие ЭМП РЧ с разной длительностью может вызывать те или иные гистологические изменения в нервных клетках.

Установлено, что влияние ЭМП частотой 900 МГц (15, 30, 60 и 120-минутные экспозиции) на нервные стволовые клетки вызывало дозозависимое уменьшение количества и размера образовавшихся нейросфер, а также процентной доли клеток, дифференцированных в нейроны, однако не влияло на их жизнеспособность и процесс апоптоза [24].

Эффекты 1-минутного действия миллиметрового диапазона (гиперполяризация плазматической мембраны и снижение амплитуды потенциала действия, сужение полуширины потенциала) совпали с данными *in silico* (компьютерного моделирования) [26, 27]. Подобные результаты были получены ранее в работе [29].

Анализ литературы показал, что изучение длительного воздействия ЭМП РЧ *in vitro*, как правило, проводилось с применением частоты 1800 МГц.

Уменьшение общей длины нейритов и количества точек ветвления на культуре клеток Neuro-2A [18, 22, 30] и первичных нейронах гиппокампа [18, 30] было зарегистрировано при воздействии ЭМП РЧ при удельном коэффициенте поглощения (SAR) 4,0 Вт/кг и длительности воздействия 48 ч. Подобные эффекты получены также для нейрональных стволовых клеток [21]. Однако даже 72-часовое воздействие ЭМП РЧ (SAR = 4,0 Вт/кг) не повлияло на жизнеспособность клеток [18].

Более выраженное снижение плотности и подвижности дендритных филоподий, плотности зрелых шипиков, уменьшение длины дендритов были выявлены при воздействии

ЭМП РЧ на нейрональные клетки гиппокампа при SAR = 2,4 Вт/кг по сравнению с SAR = 0,8 Вт/кг [17] при режиме воздействия по 15 мин в день в течение 6 дней. Кроме того, установлены ингибирование фагоцитарной способности микроглии, снижение длины и количества ветвей кортикальных аксонов при воздействии ЭМП РЧ (SAR = 4,0 Вт/кг) на нейроны первично культивированных астроцитов, нейроны коры и микроглию [23].

Нельзя не отметить интересный подход, примененный в исследовании J.H. Kim et al., в котором при одинаковых значениях SAR (4,0 Вт/кг) было проведено сравнение воздействия ЭМП частотой 1850 МГц (4 недели) на мышей с 1-го по 28-й день их постнатального развития (*in vivo*) и 1760 МГц (9 дней) на нейроны гиппокампа, полученные из мозга мышей первого дня жизни (*in vitro*). В обоих случаях уменьшалось число дендритных шипиков грибовидного типа с одновременным снижением уровня нейротрофического фактора головного мозга (brain derived neurotrophic factor (BDNF)) в соме клеток нейронов [20]. Следует особо подчеркнуть, что BDNF модулирует количество и структуру дендритных шипиков, участвует в процессах развития (например, в дифференцировке клеток, их миграции к месту дислокации, росте дендритов, синаптогенезе), выживания и поддержания активности нейронов, играет важную роль в регуляции сигнальных путей [31, 32], существует гипотеза, что его снижение играет не последнюю роль в патогенезе депрессивных заболеваний.

Воздействие ЭМП РЧ на миелиновую оболочку. Анализируя воздействия ЭМП РЧ на изолированные нервные клетки, нельзя обойти стороной вопросы его влияния на миелиновую оболочку нервных клеток. Однако такие исследования единичны – в частности, в обзорах [6, 9] большая часть информации касается структурных особенностей миелиновой оболочки, ее функций и возможных путей нарушений ее целостности.

Тем не менее утолщение миелиновой оболочки в клетках спинного мозга было зафик-

сировано при воздействии ЭМП частотой 900 МГц в экспериментах [33], а ее повреждение – при действии частоты 835 МГц. Однако структурных изменений тел нейронов коры головного мозга не было обнаружено [34].

Значительные изменения в характере миелинизации нервных волокон головного мозга зафиксированы после длительного воздействия ЭМП частотой 2100 ГГц [35, 36].

Таким образом, воздействие ЭМП РЧ на изолированные нервные клетки приводит к их многочисленным структурно-функциональным изменениям, а в совокупности с процессами нарушения целостности миелиновой оболочки может существенно повлиять на проведение нервного импульса.

Воздействие ЭМП РЧ на ГЭБ. История изучения влияния ЭМП РЧ на ГЭБ достаточно полно изложена в книгах [3, 4], а в обзоре [5] суммированы методы оценки проницаемости ГЭБ (окрашивание синим Эванса, иммуногистохимическое окрашивание альбумином, измерение трансэндотелиального электрического сопротивления (TEER), метод окрашивания пероксидазой хрена и отслеживания (14) С-сахарозы и др.), в т. ч. и после воздействия ЭМП РЧ.

Однако, как показал анализ литературы последних лет, влияние ЭМП РЧ на ГЭБ изучено слабо, в современных публикациях нередко рассматриваются эффекты однократного воздействия. Результаты экспериментов *in vitro* также невозможно сравнить, поскольку авторами использовались различные как модели, так и режимы воздействия.

Неоднозначность полученных результатов о возможных нарушениях ГЭБ при воздействии ЭМП РЧ отражена в обзоре J.H. Kim et al. [9], в частности обнаружено:

- увеличение проницаемости ГЭБ, связанное с интенсивностью воздействия (SAR) ЭМП РЧ, которое вызывает повышение температуры, т. е. тепловые эффекты;
- негативное воздействие ЭМП РЧ при отсутствии теплового эффекта;
- полное отсутствие каких-либо негативных последствий воздействия ЭМП РЧ.

Авторы полагают, что при таких противоречивых результатах нельзя дать однозначный ответ о воздействии ЭМП РЧ на ГЭБ. Подтверждением этому могут служить исследования J. Tang et al. [37], J.W. Finnie et al. [38] и M. Kuribayashi et al. [39].

Тем не менее интересны экспериментальные исследования *in vitro*, проведенные A. Schirmacher et al. [40] и L.-F. Wang et al. [28]. В частности, A. Schirmacher et al. использовали модель, которая представляла собой совместную культуру, состоящую из астроцитов крысы и эндотелиальных клеток капилляров головного мозга свиньи. Оценку изменения проницаемости проводили с использованием (14) С-сахарозы. Было показано, что ЭМП РЧ (1,8 ГГц) значительно увеличило проницаемость для (14) С-сахарозы по сравнению с необлученными образцами [40]. Если в исследовании A. Schirmacher et al. лишь констатировался факт нарушения проницаемости ГЭБ, то в работе

L.-F. Wang et al. показано, что 5-минутное действие (50 мВт/см², 2,856 ГГц) приводило к повреждению модели ГЭБ с использованием клеточной линии ECV304 и первичных астроцитов головного мозга крысы, которое выражалось в расширении и разрушении межклеточных плотных контактов со снижением трансэндотелиального электрического сопротивления и повышением проницаемости [28].

Заключение. Установлено, что однократное и особенно хроническое воздействие ЭМП РЧ *in vitro* (на изолированные нервные клетки) приводит к многочисленным структурно-функциональным изменениям нервных клеток, нарушению их миелиновой оболочки, целостности ГЭБ.

Приведенные результаты могут быть применены для оценки морфогистологических эффектов, полученных *in vivo* при воздействии ЭМП РЧ на структуры ЦНС экспериментальных животных.

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 Ю.Г., Григорьев П.Е. Влияние низкоинтенсивных электромагнитных полей на антенатальный период развития организма. Часть 1. От гаметогенеза до родов (обзор) // Журн. мед.-биол. исследований. 2017. Т. 5, № 4. С. 42–54. <http://dx.doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42>
2. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Григорьев П.Е. Влияние низкоинтенсивных электромагнитных полей на антенатальный период развития организма. Часть 2. Отдаленные последствия в постнатальный период (обзор) // Журн. мед.-биол. исследований. 2018. Т. 6, № 1. С. 41–55. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2018.6.1.41>
3. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2013. 567 с.
4. Григорьев Ю.Г., Хорсева Н.И. Мобильная связь и здоровье детей. Оценка опасности применения мобильной связи детьми и подростками. Рекомендации детям и родителям. М.: Экономика, 2014. 230 с.
5. 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>
6. Redmayne M., Johansson O. Could Myelin Damage from Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure Help Explain the Functional Impairment Electrohypersensitivity? A Review of the Evidence // J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev. 2014. Vol. 17, № 5. P. 247–258. <https://doi.org/10.1080/10937404.2014.923356>
7. Zhi W.-J., Wang L.-F., Hu X.-J. Recent Advances in the Effects of Microwave Radiation on Brains // Mil. Med. Res. 2017. Vol. 4, № 1. Art. № 29. <https://doi.org/10.1186/s40779-017-0139-0>
8. Narayanan S.N., Jetti R., Kesari K.K., Kumar R.S., Nayak S.B., Bhat P.G. Radiofrequency Electromagnetic Radiation-Induced Behavioral Changes and Their Possible Basis // Environ. Sci. Pollut. Res. 2019. Vol. 26, № 30. P. 30693–30710. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06278-5>

9. Kim J.H., Lee J.-K., Kim H.-G., Kim K.-B., Kim H.R. Possible Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure on Central Nerve System // *Biomol. Ther.* 2019. Vol. 27, № 3. P. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>
10. Romeo S., Zeni O., Scarfi M.R., Poeta L., Lioi M.B., Sannino A. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and Apoptosis: A Scoping Review of *in vitro* Studies on Mammalian Cells // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Vol. 23, № 4. Art. № 2322. <https://doi.org/10.3390/ijms23042322>
11. Markov M., Grigoriev Yu.G. Wi-Fi Technology – an Uncontrolled Global Experiment on the Health of Mankind // *Electromagn. Biol. Med.* 2013. Vol. 32, № 2. P. 200–208. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776430>
12. Григорьев Ю.Г., Самойлов А.С. 5G-стандарт сотовой связи. Суммарная радиобиологическая оценка опасности планетарного электромагнитного облучения населения: моногр. М.: Федер. мед. биофиз. центр им. А.И. Бурназяна ФМБА, 2021. 220 с.
13. Karipidis K., Mate R., Urban D., Tinker R., Wood A. 5G Mobile Networks and Health—a State-of-the-Science Review of the Research into Low-Level RF Fields Above 6 GHz // *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.* 2021. Vol. 31, № 4. P. 585–605. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00297-6>
14. Nyberg N.R., McCredden J.E., Weller S.G., Hardell L. The European Union Prioritises Economics Over Health in the Rollout of Radiofrequency Technologies // *Rev. Environ. Health.* 2022. Vol. 39, № 1. P. 47–64. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0106>
15. Hu C., Zuo H., Li Y. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Neurotransmitters in the Brain // *Front. Public Health.* 2021. Vol. 9. Art. № 691880. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880>
16. Sienkiewicz Z., van Rongen E. Can Low-Level Exposure to Radiofrequency Fields Effect Cognitive Behaviour in Laboratory Animals? A Systematic Review of the Literature Related to Spatial Learning and Place Memory // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. Vol. 16, № 9. Art. № 1607. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091607>
17. Ning W., Xu S.-J., Chiang H., Xu Z.-P., Zhou S.-Y., Yang W., Luo J.-H. Effects of GSM 1800 MHz on Dendritic Development of Cultured Hippocampal Neurons // *Acta Pharmacol. Sin.* 2007. Vol. 28, № 12. P. 1873–1880. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7254.2007.00668.x>
18. Li Y., Deng P., Chen C., Ma Q., Pi H., He M., Lu Y., Gao P., Zhou C., He Z., Zhang Y., Yu Z., Zhang L. 1,800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Irradiation Impairs Neurite Outgrowth with a Decrease in Rap1-GTP in Primary Mouse Hippocampal Neurons and Neuro2a Cells // *Front. Public Health.* 2021. Vol. 9. Art. № 771508. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.771508>
19. Echchgadda I., Cantu J.C., Tolstykh G.P., Butterworth J.W., Payne J.A., Ibey B.L. Changes in the Excitability of Primary Hippocampal Neurons Following Exposure to 3.0 GHz Radiofrequency Electromagnetic Fields // *Sci. Rep.* 2022. Vol. 12. Art. № 3506. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06914-0>
20. 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>
21. Chen C., Ma Q., Liu C., Deng P., Zhu G., Zhang L., He M., Lu Y., Duan W., Pei L., Li M., Yu Z., Zhou Z. Exposure to 1800 MHz Radiofrequency Radiation Impairs Neurite Outgrowth of Embryonic Neural Stem Cells // *Sci. Rep.* 2014. Vol. 4. Art. № 5103. <https://doi.org/10.1038/srep05103>
22. Chen C., Ma Q., Deng P., Lin M., Gao P., He M., Lu Y., Pi H., He Z., Zhou C., Zhang Y., Yu Z., Zhang L. 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Field Impairs Neurite Outgrowth Through Inhibiting EPHA5 Signaling // *Front. Cell Dev. Biol.* 2021. Vol. 9. Art. № 657623. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.657623>
23. Su L., Yimaer A., Xu Z., Chen G. Effects of 1800 MHz RF-EMF Exposure on DNA Damage and Cellular Functions in Primary Cultured Neurogenic Cells // *Int. J. Radiat. Biol.* 2018. Vol. 94, № 3. P. 295–305. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1432913>
24. Eghlidospour M., Ghanbari A., Mortazavi S.M., Azari H. Effects of Radiofrequency Exposure Emitted from a GSM Mobile Phone on Proliferation, Differentiation, and Apoptosis of Neural Stem Cells // *Anat. Cell Biol.* 2017. Vol. 50, № 2. P. 115–123. <https://doi.org/10.5115/acb.2017.50.2.115>
25. El Khoueiry C., Moretti D., Renom R., Camera F., Orlacchio R., Garenne A., Poullietier De Gannes F., Poque-Haro E., Lagroye I., Veyret B., Lewis N. Decreased Spontaneous Electrical Activity in Neuronal Networks Exposed to Radiofrequency 1,800 MHz Signals // *J. Neurophysiol.* 2018. Vol. 120, № 6. P. 2719–2729. <https://doi.org/10.1152/jn.00589.2017>

26. Romanenko S., Siegel P.H., Wagenaar D.A., Pikov V. Effects of Millimeter Wave Irradiation and Equivalent Thermal Heating on the Activity of Individual Neurons in the Leech Ganglion // *J. Neurophysiol.* 2014. Vol. 112, № 10. P. 2423–2431. <https://doi.org/10.1152/jn.00357.2014>
27. Romanenko S., Harvey A.R., Hool L., Fan S., Wallace V.P. Millimeter Wave Radiation Activates Leech Nociceptors via TRPV1-Like Receptor Sensitization // *Biophys. J.* 2019. Vol. 116, № 12. P. 2331–2345. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2019.04.021>
28. Wang L.-F., Li X., Gao Y.-B., Wang S.-M., Zhao L., Dong J., Yao B.-W., Xu X.-P., Chang G.-M., Zhou H.-M., Hu X.-J., Peng R.-Y. Activation of VEGF/Flk-1-ERK Pathway Induced Blood–Brain Barrier Injury After Microwave Exposure // *Mol. Neurobiol.* 2015. Vol. 52, № 1. P. 478–491. <https://doi.org/10.1007/s12035-014-8848-9>
29. Pikov V., Arakaki X., Harrington M., Fraser S.E., Siegel P.H. Modulation of Neuronal Activity and Plasma Membrane Properties with Low-Power Millimeter Waves in Organotypic Cortical Slices // *J. Neural Eng.* 2010. Vol. 7, № 4. Art. № 045003. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/7/4/045003>
30. Huang M., Liang C., Li S., Zhang J., Guo D., Zhao B., Liu Y., Peng Y., Xu J., Liu W., Guo G., Shi L. Two Autism/Dyslexia Linked Variations of *DOCK4* Disrupt the Gene Function on Rac1/Rap1 Activation, Neurite Outgrowth, and Synapse Development // *Front. Cell. Neurosci.* 2020. Vol. 13. Art. № 577. <https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00577>
31. Фоминова В.Н., Гурина О.И., Шепелева И.И., Попова Т.Н., Кекелидзе З.И., Чехонин В.П. Нейротрофический фактор головного мозга: структура и взаимодействие с рецепторами // *Рос. психиатр. журн.* 2018. № 4. С. 64–72.
32. Сутормина Н.В. Роль нейротрофического фактора мозга (BDNF) в физической активности (обзор) // *Комплекс. исслед. детства.* 2022. Т. 4, № 2. С. 124–133. <https://doi.org/10.33910/2687-0223-2022-4-2-124-133>
33. İkinç A., Mercantepe T., Unal D., Erol H.S., Şahin A., Aslan A., Baş O., Erdem H., Sönmez O.F., Kaya H., Odacı E. Morphological and Antioxidant Impairments in the Spinal Cord of Male Offspring Rats Following Exposure to a Continuous 900 MHz Electromagnetic Field During Early and Mid-Adolescence // *J. Chem. Neuroanat.* 2016. Vol. 75, pt B. P. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2015.11.006>
34. Kim J.H., Yu D.-H., Huh Y.H., Lee E.H., Kim H.-G., Kim H.R. Long-Term Exposure to 835 MHz RF-EMF Induces Hyperactivity, Autophagy and Demyelination in the Cortical Neurons of Mice // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. Art. № 41129. <https://doi.org/10.1038/srep41129>
35. Sharma A., Sharma S., Shrivastava S., Singhal P.K., Shukla S. Mobile Phone Induced Cognitive and Neurochemical Consequences // *J. Chem. Neuroanat.* 2019. Vol. 102. Art. № 101684. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2019.101684>
36. Sharma A., Shrivastava S., Singh A., Gupte S.S., Rathour A., Reshi M.S., Shukla S. Evidences of the Radiofrequency Exposure on the Antioxidant Status, Potentially Contributing to the Inflammatory Response and Demyelination in Rat Brain // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2022. Vol. 94. Art. № 103903. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103903>
37. 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 mcp-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>
38. Finnie J.W., Blumbergs P.C., Manavis J., Utteridge T.D., Gebiski V., Davies R.A., Vernon-Roberts B., Kuchel T.R. Effect of Long-Term Mobile Communication Microwave Exposure on Vascular Permeability in Mouse Brain // *Pathology.* 2002. Vol. 34, № 4. P. 344–347. <https://doi.org/10.1080/003130202760120517>
39. Kuribayashi M., Wang J., Fujiwara O., Doi Y., Nabae K., Tamano S., Ogiso T., Asamoto M., Shirai T. Lack of Effects of 1439 MHz Electromagnetic Near Field Exposure on the Blood–Brain Barrier in Immature and Young Rats // *Bioelectromagnetics.* 2005. Vol. 26, № 7. P. 578–588. <https://doi.org/10.1002/bem.20138>
40. Schirmacher A., Winters S., Fischer S., Goeke J., Galla H.J., Kullnick U., Ringelstein E.B., Stögbauer F. Electromagnetic Fields (1.8 GHz) Increase the Permeability to Sucrose of the Blood–Brain Barrier *in vitro* // *Bioelectromagnetics.* 2000. Vol. 21, № 5. P. 338–345.

References

1. Khorseva N.I., Grigor'ev Yu.G., Grigor'ev P.E. Influence of Low-Intensity Electromagnetic Fields on the Organism's Antenatal Development. Part 1. From Gametogenesis to Birth. *J. Med. Biol. Res.*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 42–54. <http://dx.doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42>
2. Khorseva N.I., Grigor'ev Yu.G., Grigor'ev P.E. Influence of Low-Intensity Electromagnetic Fields on the Organism's Antenatal Development. Part 2. Late Effects During the Postnatal Period (Review). *J. Med. Biol. Res.*, 2018, vol. 6, no. 1, pp. 41–55. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2018.6.1.41>

3. Grigor'ev Yu.G., Grigor'ev O.A. *Sotovaya svyaz' i zdorov'e: elektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy, prognoz opasnosti* [Cellular Communication and Health: Electromagnetic Environment, Radiobiology and Hygiene Problems, Forecast of Danger]. Moscow, 2013. 567 p.

4. Grigor'ev Yu.G., Khorseva N.I. *Mobil'naya svyaz' i zdorov'e detey. Otsenka opasnosti primeneniya mobil'noy svyazi det'mi i podrostkami. Rekomendatsii detyam i roditelyam* [Mobile Communications and Child Health. Risk Assessment of the Use of Mobile Communications by Children and Adolescents. Recommendations for Children and Their Parents]. Moscow, 2014. 230 p.

5. 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>

6. Redmayne M., Johansson O. Could Myelin Damage from Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure Help Explain the Functional Impairment Electrohypersensitivity? A Review of the Evidence. *J. Toxicol. Environ. Health B Crit. Rev.*, 2014, vol. 17, no. 5, pp. 247–258. <https://doi.org/10.1080/10937404.2014.923356>

7. Zhi W.-J., Wang L.-F., Hu X.-J. Recent Advances in the Effects of Microwave Radiation on Brains. *Mil. Med. Res.*, 2017, vol. 4, no. 1. Art. no. 29. <https://doi.org/10.1186/s40779-017-0139-0>

8. Narayanan S.N., Jetti R., Kesari K.K., Kumar R.S., Nayak S.B., Bhat P.G. Radiofrequency Electromagnetic Radiation-Induced Behavioral Changes and Their Possible Basis. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2019, vol. 26, no. 30, pp. 30693–30710. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06278-5>

9. Kim J.H., Lee J.-K., Kim H.-G., Kim K.-B., Kim H.R. Possible Effects of Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure on Central Nerve System. *Biomol. Ther.*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>

10. Romeo S., Zeni O., Scarfi M.R., Poeta L., Lioi M.B., Sannino A. Radiofrequency Electromagnetic Field Exposure and Apoptosis: A Scoping Review of *in vitro* Studies on Mammalian Cells. *Int. J. Mol. Sci.*, 2022, vol. 23, no. 4. Art. no. 2322. <https://doi.org/10.3390/ijms23042322>

11. Markov M., Grigoriev Yu.G. Wi-Fi Technology – an Uncontrolled Global Experiment on the Health of Mankind. *Electromagn. Biol. Med.*, 2013, vol. 32, no. 2, pp. 200–208. <https://doi.org/10.3109/15368378.2013.776430>

12. Grigoriev Yu.G., Samoylov A.S. *5G-standart sotovoy svyazi. Summarnaya radiobiologicheskaya otsenka opasnosti planetarnogo elektromagnitnogo oblucheniya naseleniya* [5G Cellular Standards. Total Radiobiological Assessment of the Danger of Planetary Electromagnetic Radiation Exposure to the Population]. Moscow, 2021. 220 p.

13. Karipidis K., Mate R., Urban D., Tinker R., Wood A. 5G Mobile Networks and Health – a State-of-the-Science Review of the Research into Low-Level RF Fields Above 6 GHz. *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 2021, vol. 31, no. 4, pp. 585–605. <https://doi.org/10.1038/s41370-021-00297-6>

14. Nyberg N.R., McCredden J.E., Weller S.G., Hardell L. The European Union Prioritises Economics over Health in the Rollout of Radiofrequency Technologies. *Rev. Environ. Health*, 2022, vol. 39, no. 1, pp. 47–64. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0106>

15. Hu C., Zuo H., Li Y. Effects of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Neurotransmitters in the Brain. *Front. Public Health*, 2021, vol. 9. Art. no. 691880. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.691880>

16. Sienkiewicz Z., van Rongen E. Can Low-Level Exposure to Radiofrequency Fields Effect Cognitive Behaviour in Laboratory Animals? A Systematic Review of the Literature Related to Spatial Learning and Place Memory. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2019, vol. 16, no. 9. Art. no. 1607. <https://doi.org/10.3390/ijerph16091607>

17. Ning W., Xu S.-J., Chiang H., Xu Z.-P., Zhou S.-Y., Yang W., Luo J.-H. Effects of GSM 1800 MHz on Dendritic Development of Cultured Hippocampal Neurons. *Acta Pharmacol. Sin.*, 2007, vol. 28, no. 12, pp. 1873–1880. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7254.2007.00668.x>

18. Li Y., Deng P., Chen C., Ma Q., Pi H., He M., Lu Y., Gao P., Zhou C., He Z., Zhang Y., Yu Z., Zhang L. 1,800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Irradiation Impairs Neurite Outgrowth with a Decrease in Rap1-GTP in Primary Mouse Hippocampal Neurons and Neuro2a Cells. *Front. Public Health*, 2021, vol. 9. Art. no. 771508. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2021.771508>

19. Echchgadda I., Cantu J.C., Tolstykh G.P., Butterworth J.W., Payne J.A., Ibey B.L. Changes in the Excitability of Primary Hippocampal Neurons Following Exposure to 3.0 GHz Radiofrequency Electromagnetic Fields. *Sci. Rep.*, 2022, vol. 12. Art. no. 3506. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06914-0>

20. 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>

21. Chen C., Ma Q., Liu C., Deng P., Zhu G., Zhang L., He M., Lu Y., Duan W., Pei L., Li M., Yu Z., Zhou Z. Exposure to 1800 MHz Radiofrequency Radiation Impairs Neurite Outgrowth of Embryonic Neural Stem Cells. *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4. Art. no. 5103. <https://doi.org/10.1038/srep05103>
22. Chen C., Ma Q., Deng P., Lin M., Gao P., He M., Lu Y., Pi H., He Z., Zhou C., Zhang Y., Yu Z., Zhang L. 1800 MHz Radiofrequency Electromagnetic Field Impairs Neurite Outgrowth Through Inhibiting EphA5 Signaling. *Front. Cell Dev. Biol.*, 2021, vol. 9. Art. no. 657623. <https://doi.org/10.3389/fcell.2021.657623>
23. Su L., Yimaer A., Xu Z., Chen G. Effects of 1800 MHz RF-EMF Exposure on DNA Damage and Cellular Functions in Primary Cultured Neurogenic Cells. *Int. J. Radiat. Biol.*, 2018, vol. 94, no. 3, pp. 295–305. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1432913>
24. Eghlidospour M., Ghanbari A., Mortazavi S.M.J., Azari H. Effects of Radiofrequency Exposure Emitted from a GSM Mobile Phone on Proliferation, Differentiation, and Apoptosis of Neural Stem Cells. *Anat. Cell Biol.*, 2017, vol. 50, no. 2, pp. 115–123. <https://doi.org/10.5115/acb.2017.50.2.115>
25. El Khouairy C., Moretti D., Renom R., Camera F., Garenne A., Poullietier De Gannes F., Poque-Haro E., Lagroye I., Veyret B., Lewis N. Decreased Spontaneous Electrical Activity in Neuronal Networks Exposed to Radiofrequency 1,800 MHz Signals. *J. Neurophysiol.*, 2018, vol. 120, no. 6, pp. 2719–2729. <https://doi.org/10.1152/jn.00589.2017>
26. Romanenko S., Siegel P.H., Wagenaar D.A., Pikov V. Effects of Millimeter Wave Irradiation and Equivalent Thermal Heating on the Activity of Individual Neurons in the Leech Ganglion. *J. Neurophysiol.*, 2014, vol. 112, no. 10, pp. 2423–2431. <https://doi.org/10.1152/jn.00357.2014>
27. Romanenko S., Harvey A.R., Hool L., Fan S., Wallace V.P. Millimeter Wave Radiation Activates Leech Nociceptors via TRPV1-Like Receptor Sensitization. *Biophys. J.*, 2019, vol. 116, no. 12, pp. 2331–2345. <https://doi.org/10.1016/j.bpj.2019.04.021>
28. Wang L.-F., Li X., Gao Y.-B., Wang S.-M., Zhao L., Dong J., Yao B.-W., Xu X.-P., Chang G.-M., Zhou H.-M., Hu X.-J., Peng R.-Y. Activation of VEGF/Flk-1-ERK Pathway Induced Blood–Brain Barrier Injury After Microwave Exposure. *Mol. Neurobiol.*, 2015, vol. 52, no. 1, pp. 478–491. <https://doi.org/10.1007/s12035-014-8848-9>
29. Pikov V., Arakaki X., Harrington M., Fraser S.E., Siegel P.H. Modulation of Neuronal Activity and Plasma Membrane Properties with Low-Power Millimeter Waves in Organotypic Cortical Slices. *J. Neural Eng.*, 2010, vol. 7, no. 4. Art. no. 045003. <https://doi.org/10.1088/1741-2560/7/4/045003>
30. Huang M., Liang C., Li S., Zhang J., Guo D., Zhao B., Liu Y., Peng Y., Xu J., Liu W., Guo G., Shi L. Two Autism/Dyslexia Linked Variations of *DOCK4* Disrupt the Gene Function on Rac1/Rap1 Activation, Neurite Outgrowth, and Synapse Development. *Front. Cell. Neurosci.*, 2020, vol. 13. Art. no. 577. <https://doi.org/10.3389/fncel.2019.00577>
31. Fominova U.N., Gurina O.I., Shepeleva I.I., Popova T.N., Kekelidze Z.I., Chekhonin V.P. Neyrotroficheskiy faktor golovnogo mozga: struktura i vzaimodeystvie s retseptorami [Brain-Derived Neurotrophic Factor: Structure and Interaction with Receptors]. *Rossiyskiy psikiatricheskiy zhurnal*, 2018, no. 4, pp. 64–72.
32. Sutormina N.V. Brain-Derived Neurotrophic Factor and Physical Activity: A Review. *Compr. Child Stud.*, 2022, vol. 4, no. 2, pp. 124–133. <https://doi.org/10.33910/2687-0223-2022-4-2-124-133>
33. İkinci A., Mercantepe T., Unal D., Erol H.S., Şahin A., Aslan A., Baş O., Erdem H., Sönmez O.F., Kaya H., Odacı E. Morphological and Antioxidant Impairments in the Spinal Cord of Male Offspring Rats Following Exposure to a Continuous 900 MHz Electromagnetic Field During Early and Mid-Adolescence. *J. Chem. Neuroanat.*, 2016, vol. 75, pt. B, pp. 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2015.11.006>
34. Kim J.H., Yu D.-H., Huh Y.H., Lee E.H., Kim H.-G., Kim H.R. Long-Term Exposure to 835 MHz RF-EMF Induces Hyperactivity, Autophagy and Demyelination in the Cortical Neurons of Mice. *Sci. Rep.*, 2017, vol. 7. Art. no. 41129. <https://doi.org/10.1038/srep41129>
35. Sharma A., Sharma S., Shrivastava S., Singhal P.K., Shukla S. Mobile Phone Induced Cognitive and Neurochemical Consequences. *J. Chem. Neuroanat.*, 2019, vol. 102. Art. no. 101684. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2019.101684>
36. Sharma A., Shrivastava S., Singh A., Gupte S.S., Rathour A., Reshi M.S., Shukla S. Evidences of the Radiofrequency Exposure on the Antioxidant Status, Potentially Contributing to the Inflammatory Response and Demyelination in Rat Brain. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 2022, vol. 94. Art. no. 103903. <https://doi.org/10.1016/j.etap.2022.103903>

37. 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. Art. no. 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.01.019>

38. Finnie J.W., Blumbergs P.C., Manavis J., Utteridge T.D., Gebski V., Davies R.A., Vernon-Roberts B., Kuchel T.R. Effect of Long-Term Mobile Communication Microwave Exposure on Vascular Permeability in Mouse Brain. *Pathology*, 2002, vol. 34, no. 4, pp. 344–347. <https://doi.org/10.1080/003130202760120517>

39. Kuribayashi M., Wang J., Fujiwara O., Doi Y., Nabae K., Tamano S., Ogiso T., Asamoto M., Shirai T. Lack of Effects of 1439 MHz Electromagnetic Near Field Exposure on the Blood–Brain Barrier in Immature and Young Rats. *Bioelectromagnetics*, 2005, vol. 26, no. 7, pp. 578–588. <https://doi.org/10.1002/bem.20138>

40. Schirmacher A., Winters S., Fischer S., Goeke J., Galla H.J., Kullnick U., Ringelstein E.B., Stögbauer F. Electromagnetic Fields (1.8 GHz) Increase the Permeability to Sucrose of the Blood–Brain Barrier *in vitro*. *Bioelectromagnetics*, 2000, vol. 21, no. 5, pp. 338–345.

Поступила в редакцию 15.09.2023 / Одобрена после рецензирования 27.12.2023 / Принята к публикации 05.02.2024.
Submitted 15 September 2023 / Approved after reviewing 27 December 2023 / Accepted for publication 5 February 2024.