



Обзорная статья  
УДК 612.8:57.042  
DOI: 10.37482/2687-1491-Z195

## Эффекты воздействий радиочастотных электромагнитных полей на нервную систему. Эксперименты *in vivo* (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)

**Аннотация.** Статья является продолжением работы, в первой части<sup>1</sup> которой были проанализированы публикации, посвященные эффектам влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) *in vitro* на центральную нервную систему (ЦНС) (изменениям потенциала действия, морфологии клеток и миелиновой оболочки, проницаемости гематоэнцефалического барьера (с использованием культур только нервных клеток)), в ней также изложены разнообразные подходы к изучению воздействия ЭМП РЧ и обнаружены трудности систематизации данных. В представленной публикации рассматриваются вопросы морфогистологических изменений ЦНС при воздействии ЭМП РЧ у молодых животных, поскольку это позволяет дать опосредованную оценку возможных негативных последствий воздействия ЭМП РЧ на организм детей и подростков как самой уязвимой к любым факторам внешней среды когорты. Проанализированы морфологические и гистологические изменения структур ЦНС (коры головного мозга, ствола головного мозга, мозжечка, структур слуховой системы и др.), а также изменяющиеся параметры электроэнцефалограммы. Отдельно рассмотрен большой массив данных о морфологических и гистологических изменениях в гиппокампе. Кроме того, представлен анализ изменения биометрических показателей экспериментальных животных при хроническом воздействии ЭМП РЧ и его влияния на жизнеспособность клеток (включая процессы апоптоза и аутофагии нервных клеток). Таким образом, наличие надежной базы современных экспериментальных исследований, свидетельствующей о доказанном серьезном характере и глубине проблемы влияния электромагнитных полей сотовой связи на нервную систему детей и подростков, крайне важно в контексте все возрастающего электромагнитного загрязнения, прежде всего электромагнитными полями сотовой связи.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле радиочастотного диапазона, Wi-Fi, 5G, отделы головного мозга, гиппокамп, слуховая система, морфогистологические изменения *in vivo*, молодые животные

<sup>1</sup>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., 2024

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

**Финансирование:** Работа выполнена в рамках государственного задания Института биохимической физики им. Н.М. Эмануэля Российской академии наук (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 vivo* (обзор) / Н. И. Хорсева, П. Е. Григорьев // Журнал медико-биологических исследований. – 2024. – Т. 12, № 3. – С. 383-398. – DOI 10.37482/2687-1491-Z195.

Review article

## Effects of Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. *In vivo* 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)

**Abstract.** This article is a continuation of a review whose first part analysed the works on the effect of radio frequency electromagnetic fields (RF EMF) on the central nervous system (CNS) *in vitro* (changes in the action potential, cell and myelin sheath morphology, as well as in the permeability of the blood–brain barrier (using cultures of nerve cells only); in addition, it presented various approaches to studying the effects of RF EMF and pointed out difficulties of systematizing the experimental data. The present article dwells on the morpho-histological changes in CNS structures under RF EMF exposure in young animals, since it allows us to give an indirect assessment of possible negative consequences of RF EMF exposure for children and adolescents as the cohort most vulnerable to any environmental factors. Morphological and histological changes in CNS structures (cerebral cortex, brainstem, cerebellum, auditory system, etc.) as well as changing electroencephalographic parameters were analysed. A bulk of data on the morphological and histological changes in the hippocampus was considered separately. In addition, the paper presents an analysis of changes in the biometric parameters of experimental animals under chronic exposure to RF EMF and its effect on cell viability (including nerve cell apoptosis and autophagy). Thus, having a reliable corpus of modern experimental studies proving the seriousness of the problem of the effects of electromagnetic fields on the nervous system in children and adolescents is important in the context of ever-increasing electromagnetic pollution, primarily from electromagnetic fields produced by cellular networks.

**Keywords:** *radio frequency electromagnetic field, Wi-Fi, 5G, parts of the brain, hippocampus, auditory system, morpho-histological changes in vivo, young animals*

---

**Corresponding author:** Natalia Khorseva, address: ul. Kosygina 4, Moscow, 119334, Russia;  
e-mail: sheridan1957@mail.ru

**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 Radio Frequency Electromagnetic Fields on the Nervous System. *In vivo Experiments (Review)*. *Journal of Medical and Biological Research*, 2024, vol. 12, no. 3, pp. 383–398. DOI: 10.37482/2687-1491-Z195

Известно, что для исследования воздействия электромагнитных полей радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) на нервную систему применяются различные виды животных: крысы (Wistar, Sprague-Dawley (SD), Fischer-344), мыши (куньминские, швейцарские, BALB/c, C57BL/6, NMRI), кролики, обезьяны (макаки-резусы (*Macaca mulatta*)) были использованы для оценки биоэффекта микроволнового воздействия на глаза), а также яйца домашней птицы и даже трансгенные нематоды [1].

В данном обзоре представлены результаты воздействия ЭМП РЧ на структуры головного мозга молодых животных – мышей и крыс.

Диапазон используемых частот был достаточно широк (от 900 МГц до 42,25 ГГц), равно как и сама действующая нагрузка – показатель поглощения электромагнитной энергии за 1 с (SAR; от 0,0067 до 7,0 Вт/кг). Однако в большинстве исследований она не превышает предельно допустимого уровня, принятого в Европе (2 Вт/кг у головы и 4 Вт/кг для тела) [2]. К сожалению, SAR не конвертируется однозначно в показатель «плотность потока энергии» (ППЭ, мкВт/см<sup>2</sup>), используемый в России, поэтому невозможно напрямую сравнить эти два параметра и оценить уровень воздействия ЭМП РЧ по стандартам нашей страны.

Однако в исследованиях [3–5] с помощью метода конечных разностей значения ППЭ были переведены в значения SAR с учетом применяемого частотного диапазона.

Анализ экспериментальных данных основывался на материалах публикаций, взя-

тых 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/>.

#### **Изменения биометрических показателей экспериментальных животных при воздействии ЭМП РЧ**

Изменений биометрических показателей, в частности массы тела у экспериментальных животных при воздействии ЭМП частотой 900 [6–11] и 1 800 [12] МГц, в широком диапазоне значений SAR (0,0067–2,7 Вт/кг) и при практически одинаковых режимах воздействия (чаще 1 ч/сут, реже 6 ч/сут; в течение 28 дней) обнаружено не было. При более длительном воздействии ЭМП частотой 900 МГц (60 дней) в группах молодых и взрослых крыс существенные изменения массы тела не выявлены, однако отмечено снижение абсолютной массы мозга в первой группе, что привело к значительному уменьшению относительной массы мозга по сравнению с массой тела [13]. Тем не менее сразу после 15-дневного воздействия ЭМП частотой 10 ГГц были зарегистрированы значительные изменения массы тела у 2-недельных мышей и незначительные изменения у 6-недельных [14].

#### **Изменения в гиппокампе молодых экспериментальных животных при воздействии ЭМП РЧ**

Как показал анализ экспериментальных данных, основным объектом в области изучения воздействия ЭМП РЧ на структуры центральной нервной системы (ЦНС) молодых

животных является гиппокамп. Этот выбор продиктован тем, что гиппокамп, являясь частью лимбической системы головного мозга, задействован не только в механизмах формирования эмоций, но и в переходе кратковременной памяти в долговременную и в функционировании пространственной памяти, а также генерирует тета-ритм, который играет критически важную роль в процессах внимания и памяти.

*Морфологические изменения.* ЭМП РЧ влияют на количество клеток. Так, в работе [15] было выявлено снижение числа нейронов в областях СА1 и СА2, с одновременным снижением количества клеток в области СА3 и вентральной части зубчатой извилины (ЗИ), что приводило к изменению их плотности в гиппокампальных структурах.

В гиппокампе зарегистрированы уменьшение числа пирамидных клеток при воздействии 900 [8, 10, 16], 2 400 [17], 2 450 [18, 19] МГц, в частности в областях СА1, СА2, СА3 (2 400 МГц) [17], снижение их плотности в областях СА1 и СА2 (900–1 800 МГц) [15], увеличение числа гранулированных (900 МГц) [11] и зернистых клеток при действии 900 МГц [11, 20] и 2400 МГц [17].

Кроме того, обнаружены качественные изменения в гиппокампе при воздействии ЭМП РЧ. К ним можно отнести увеличение периваскулярных пространств (2 400 МГц) [21], редуцирование нервных волокон в областях СА1, СА2, СА3 и ЗИ (2 100 МГц) [22], увеличение числа пирамидных клеток с аномальными размерами и формой (2 400 МГц) [17], рост диаметра сомы (2 450 МГц) [18, 19], уменьшение диаметра нейронов в областях СА1, СА2, СА3 и вентральной и дорсальной частях ЗИ (900–1 800 МГц) [15].

Зарегистрирована дегенерация нейронов гиппокампа при действии 900 МГц [23], 2 400 МГц [17, 21], в частности в областях СА1, СА2 и СА3 [17, 24], и 2 115 МГц [25].

Особое место в исследовании морфологических изменений при воздействии ЭМП РЧ уделяется отросткам нервных клеток – аксонам и дендритам. Например, зарегистрированы

уменьшение длины аксонов пирамидных нейронов гиппокампа (2 450 МГц) [18, 19], снижение дендритной разветвленности в областях СА1, СА2 и СА3 (2 450 МГц) [18, 19], а также изменение числа дендритных шипиков. В частности, установлены снижение общего количества дендритных шипиков в ЗИ, но не в роге аммония (СА1; 1 850 МГц) [26], потеря шипиков в клетках-зернах и сморщивание зрелых шипиков в пирамидных клетках [27]. Несмотря на то, что воздействие ЭМП РЧ не вызывает уменьшения общего количества дендритных шипиков в области СА1 и ЗИ, оно снижает количество дендритных шипиков грибовидного типа [27], и данный эффект сохраняется через 28 дней после воздействия, при этом количество дендритных шипиков короткого и тонкого типов не изменяется (1 850 МГц) [26].

Такое внимание к изменению количества шипиков грибовидного типа может объясняться тем, что они имеют самый длительный срок службы и поэтому считаются местами долговременного хранения памяти [28].

*Гистологические изменения.* В клетках гиппокампа в областях СА1, СА2 и СА3 наблюдалось множество пикнозов (уплотнений и сморщиваний ядра) при воздействии ЭМП частотой 2 100 [22] и 2 400 [17] МГц. Следует отметить, что пикноз пирамидных нейронов гиппокампа при воздействии ЭМП частотой 1 800 МГц (SAR = 0,433 Вт/кг) обнаружен в областях СА1, СА2, СА3 и ЗИ [29], но не зарегистрирован на частоте 2 400 МГц при более высоких уровнях SAR (1,75 и 3,5 Вт/кг) и только при SAR = 7,0 Вт/кг выявлен в области СА3 и ЗИ [21].

Нарушения цитоплазмы нейронов в областях СА1, СА2, СА3 гиппокампа и ЗИ [11, 24], клеточный отек и дегенерация органоидов клеток обнаружены при 28-дневном воздействии ЭМП РЧ [30], дилатация эндоплазматического ретикулума и набухание митохондрий в нейронах гиппокампа – при действии ЭМП частотой 900 МГц [27], а увеличение количества лизосом, кавитация митохондрий, нечеткость синаптических разрывов – только при частоте 2 400 МГц и SAR = 7 Вт/кг [21].

Однако гистопатологические изменения наблюдались не только после хронического действия ЭМП РЧ в разных частотных диапазонах, как показано выше, но и после острого воздействия (6 мин) интенсивностью 5 и 10 мВт/см<sup>2</sup> в частотных диапазонах 1,5; 2,856 и 4,3 ГГц, а также при их последовательном влиянии: 2,856 ГГц, затем 1,5 ГГц, а также 1,5 ГГц, затем 4,3 ГГц [3–5].

Кариопикноз, неправильное расположение, отек клеток и расширение перичеселлярного пространства выявлены в областях СА1, СА3 через 6 ч [4] и 7 сут [3] после воздействия (ППЭ = 10 мВт/см<sup>2</sup>) частот 1,500 и 2,856 ГГц и при их последовательном влиянии (2,856 и 1,5 ГГц), а также при последовательном воздействии 2,856 и 1,5 ГГц с интенсивностью 5 мВт/см<sup>2</sup>, особенно в ЗИ гиппокампа.

Набухание митохондрий и разрыв гребня, даже кавитация, грубая дегрануляция и набухание эндоплазматического ретикула, расширение разрыва ядерной мембраны, а также концентрация и маргинация хроматина были обнаружены через 7 сут после воздействия (ППЭ = 10 мВт/см<sup>2</sup>) частот 1,5; 2,856 и 4,3 ГГц, а также последовательного влияния 2,856 и 1,5 ГГц [3], 1,5 и 4,3 ГГц [5]. Аналогичные результаты были получены и при более низкой интенсивности воздействия – 5 мВт/см<sup>2</sup>.

Следует особо отметить, что все вышеперечисленные изменения были более выражены для групп сочетанного воздействия радиочастот – 2,856 и 1,5 ГГц [3], 1,5 и 4,3 ГГц [5]. Так, повреждения в клетках гиппокампа зарегистрированы уже через сутки после действия 10 мВт/см<sup>2</sup> на частотах 1,5 и 4,3 ГГц, а также при их последовательном влиянии: 1,5 и 4,3 ГГц. Тем не менее уровень дегградации нейронов снижался на 14-е сутки после воздействия ЭМП РЧ, а на 28-е сутки он вообще не регистрировался [5].

Описанные выше результаты интересны тем, что авторы впервые осуществили последовательное воздействие ЭМП РЧ сразу двух частотных диапазонов.

### **Изменения в отделах ЦНС молодых экспериментальных животных при воздействии ЭМП РЧ**

*Морфологические изменения.* Зарегистрировано снижение числа нейронов в лобной коре и стволе головного мозга при действии ЭМП разных частот (900, 1 800, 2 450 МГц) [31], числа клеток Пуркинье в мозжечке при воздействии 900 [6, 32] и 2 100 [22] МГц.

Кроме того, выявлены неравномерное расположение нейронного слоя (1 800 МГц) [29], увеличение периваскулярных пространств и редуцирование нервных волокон (2 100 МГц) [22], нарушение целостности нейронов и повышение числа темных нейронов (900 МГц) в головном мозге [13]. Воздействие ЭМП частотой 2,4 ГГц (Wi-Fi) вызывает периваскулярный застой, повреждение тканей головного мозга [33], снижает интегративные свойства нейронов и может модулировать интегративные реакции в коре головного мозга [34].

Тем не менее при воздействии 835 МГц установлена структурная стабильность тел нейронов головного мозга [35], не зарегистрированы изменения и в астроцитах головного мозга при действии 900 МГц, даже очень длительном – 104 недель, т. е. астроглиоза не выявлено [36]. Кроме того, неправильный вид нейронов зарегистрирован в верхнегрудном отделе спинного мозга при действии 900 МГц [37].

*Гистологические изменения.* При воздействии ЭМП РЧ в различных частотных диапазонах гистологические изменения состояли в вакуализации нейронов коры головного мозга (900, 1 800 и 2 100 МГц) [9, 22, 29] и нервных клеток в верхнегрудном отделе спинного мозга (900 МГц) [37]; в увеличении числа темных пикнотических ядер в нейронах коры головного мозга [29] (более выраженный эффект наблюдался при 2 450 МГц по сравнению с 900 и 1 800 МГц [31]), а также в клетках Пуркинье и клетках зернистого слоя в мозжечке (900 МГц) [38].

Кроме того, при действии 900 МГц зарегистрировано снижение цитоплазматического содержания в клетках Пуркинье и зернистых клетках мозжечка, а сами клетки Пуркинье

имели эухроматические ядра с заметной цитоплазмой [38].

Воздействие ЭМП частотой 835 МГц нарушало синаптическую передачу нервного импульса в структурах головного мозга [39], стриатума [40], гипоталамуса [41], что выражалось в уменьшении количества синаптических пузырьков на единицу площади пресинаптических окончаний клеток головного мозга.

*Спонтанная электрическая активность.* Известно, что спонтанная электрическая активность нервных клеток при воздействии миллиметрового диапазона выявлялась задолго до внедрения технологий 5G, обзор которых представлен в работе S.I. Alekseev et al. [42]. Тем интереснее исследование данных авторов, проведенное на икроножном нерве мыши *in vivo* при действии миллиметрового диапазона (42,25 ГГц) с разной интенсивностью ППЭ (10–30 и 45 мВт/см<sup>2</sup>). Установлено, что более высокий уровень воздействия вызывает ингибирование спонтанной электрической активности, тогда как менее интенсивное к заметным изменениям не приводит.

#### **Изучение воздействия ЭМП РЧ на слуховую систему**

На наш взгляд, особое место занимают экспериментальные исследования влияния ЭМП РЧ на слуховую систему. Она в первую очередь подвергается воздействию, поскольку, как правило, аппарат сотовой связи пользователи подносят к уху. Однако такие исследования немногочисленны, их результаты суммированы в [43, 44].

Последние публикации указывают на то, что хроническое воздействие ЭМП РЧ на слуховую систему увеличивает нейрональную дегенерацию (рост вакуолизации в ядре улитки, появление пикнотических клеток и отека) [45, 46], апоптотический индекс в слуховой системе (при этом в клетках коры головного мозга данный эффект не зарегистрирован) [46], частоты и амплитуды постсинаптических токов, повышая общую длину пресинаптической активной зоны в чашечке Хельда [47], а также приводит к дегенерации ядер улитки (1–2 ГГц) [48].

Кроме того, длительное воздействие частоты 2,4 ГГц, излучаемой генератором Wi-Fi, вызывает целый ряд нарушений, в частности влияет на слух, изменяя значения отоакустической эмиссии продукта искажения [49].

Негативное влияние на слуховую кору оказывает и ЭМП частотой 3 500 МГц (5G; SAR 0, 2, 4 или 10 Вт/кг в течение 72 ч). Показано, что, хотя пороги слышимости и основные показатели поведения животных существенно не изменились после воздействия, наблюдались ультраструктурные изменения в слуховой коре (набухшие митохондрии и слоистые миелиновые оболочки) [50].

Тем не менее не зарегистрированы морфологические изменения в ленточных синапсах внутренних волосковых клеток при действии ЭМП РЧ (1 800 МГц) [47], отсутствовали изменения ответов слухового ствола (1 850 и 2 100 МГц) [45–47].

Таким образом, выявленные морфологические и биохимические изменения являются существенными. Несмотря на то, что пороги слухового ствола не зарегистрированы, уже доказано, что использование мобильного телефона детьми и подростками увеличивает время слухо-моторной реакции и сопровождается нарушением фонематического восприятия, развитием высокочастотной глухоты [43, 44]. Неоднозначность представленных выше результатов требует дальнейших исследований в этой области.

#### **Морфофункциональные изменения, обнаруженные с помощью электроэнцефалограммы (ЭЭГ)**

При регистрации ЭЭГ электроды крепились на коже головы. Снижение частоты, увеличение амплитуды и мощности  $\Delta$ -волн были зарегистрированы при 2 400 МГц [21], подобные изменения фиксировались и при действии 2,856 ГГц. В то же время никаких эффектов при 9,375 ГГц не обнаружено [51].

Интересны исследования по изучению морфофункциональных изменений после острого (однократного 6-минутного) воздействия ЭМП частотой 1,5; 2,856 и 4,3 ГГц, а также при по-

следовательном влиянии 2,856 и 1,5 ГГц [3–5], 1,5 и 4,3 ГГц [5]. Интенсивность ЭМП РЧ в данных работах составляла 5 и 10 мВт/см<sup>2</sup>, а параметры ЭЭГ регистрировались через 6 ч, 1, 2, 7, 14 и 28 сут после окончания воздействия.

Установлены:

– снижение мощности только  $\alpha$ -ритма через 7 сут после окончания воздействия интенсивностью 10 мВт/см<sup>2</sup> и частотой 1,5 ГГц [3];

– снижение мощности и  $\alpha$ -, и  $\beta$ -ритма через 6 ч и 7 сут после окончания воздействия интенсивностью 10 мВт/см<sup>2</sup> частот 1,5 и 2,856 ГГц и последовательного воздействия 2,856 и 1,5 ГГц [3, 4];

– увеличение мощности  $\theta$ -ритма через 6 ч, 1 день и 7 сут только для сочетанного воздействия 2,856 и 1,5 ГГц интенсивностью 10 мВт/см<sup>2</sup> [4, 5];

– увеличение  $\delta$ -ритма при воздействии интенсивностью 10 мВт/см<sup>2</sup> через 6 ч (2,856 ГГц или сочетание 2,856 и 1,5 ГГц), через 1 сут (2,856 ГГц или сочетание 1,5 и 4,3 ГГц) [4, 5].

#### **Жизнеспособность нейронов при воздействии ЭМП РЧ**

*Апоптоз. Атрофия.* Снижение жизнеспособности нейронов наблюдалось в областях СА1 (при частоте 2 400 МГц) [17] и СА3 (при частотах 900 [7] и 2 400 [17] МГц) гиппокампа.

Атрофия нейронов в верхнегрудном отделе спинного мозга была зарегистрирована при действии ЭМП частотой 900 МГц [37]. Апоптоз в структурах гиппокампа фиксировался при хроническом действии ЭМП РЧ в различных частотных диапазонах:

– 900 и 1 800 МГц (но более выражен при 1 800 МГц) [52];

– 2 450 МГц – в областях СА1, СА2, СА3 и ЗИ (не только для нейрональных, но и для нейрональных клеток) [18];

– диапазоне L-НРМ (1–2 ГГц) – в областях СА1 и СА3 [48].

Кроме того, процесс апоптоза наблюдался в ЗИ через 6 ч после острого 6-минутного воздействия интенсивностью 10 мВт/см<sup>2</sup> частот 1,5 и 2,856 ГГц и последовательного воздействия 2,856 и 1,5 ГГц [4].

Процесс апоптоза зарегистрирован и в других структурах головного мозга (900 МГц) [13], в частности в клетках Пуркинье и гранулярных клетках мозжечка (900 МГц) [38], в лобной коре и стволе мозга (более выражен при воздействии 2 450 МГц по сравнению с 900 и 1 800 МГц) [31], коре головного мозга (хроническое воздействие L-НРМ) [48], а также в клетках головного мозга (воздействие Wi-Fi) [53].

Тем не менее было установлено, что 4-недельное действие 835 МГц повышало уровень апоптоза в стволе мозга, но не в коре, а 12-недельное – приводило к накоплению аутолизосом, и проапоптотический фактор Вах подавлялся в коре головного мозга [54].

Следует отметить, что апоптоз был обнаружен не только в структурах головного мозга, но и в ганглиях задних корешков спинного мозга при действии ЭМП частотой 900 и 1 800 МГц (эффект более выражен при 1 800 МГц) [52], а также нейронах верхнегрудного отдела спинного мозга при действии ЭМП частотой 900 МГц [37].

*Аутофагия.* Известно, что аутофагия является основным катаболическим процессом удаления поврежденных органелл, агрегированных белков и внутриклеточных патогенов из клеток. Посредством данного процесса также удаляются токсические продукты, образующиеся при окислительном и карбонильном стрессе. Защитная функция аутофагии может быть полезной при многих патологиях, сопровождающихся развитием окислительного стресса [55], и в то же время при определенных обстоятельствах она может приводить к клеточной гибели и развитию онкологических, мышечных и нейродегенеративных заболеваний, кардиомиопатии и др. [56].

Хотя в настоящее время исследования, посвященные изучению влияния ЭМП РЧ на процесс аутофагии, единичны, но они представляют несомненный интерес.

При длительном воздействии (в течение 3–5 недель) ЭМП частотой 1 800 МГц, модулированном различными сигналами окружающей среды (GSM, UMTS, LTE или немодулирован-

ной непрерывной волной – СВ), в частности на культуры первичных клеток коры головного мозга крысы (астроциты и совместная культура нейронов и глиальных клеток), признаков аутофагии не выявлено [57].

В экспериментах *in vivo* при действии ЭМП частотой 835 МГц в течение 12 недель зарегистрированы накопление белков аутофагии в нейронах коры головного мозга [35], аутолизосом в коре головного мозга [54], значительная активация генов аутофагии в стриатуме и гипоталамусе [58].

Четырехнедельное воздействие ЭМП частотой 835 МГц повышало уровни генов и белков аутофагии, аутофагосом и аутолизосом в нейронах коры [58], аутолизосом в нейронах гиппокампа на фоне увеличения экспрессии генов и белков, связанных с аутофагией [59], однако не вызывало активацию генов аутофагии в стриатуме и гипоталамусе [58].

Кроме того, был предложен механизм подавления апоптоза клеток гиппокампа за счет увеличения аутофагии [59].

Авторы представленных выше публикаций подчеркивают, что процессы аутофагии могут действовать как адаптационный и защитный путь для нейрональных клеток при воздействии ЭМП РЧ.

Наконец, обзор J.H. Kim et al., опубликованный в 2019 году, суммирует накопленные данные о воздействии ЭМП РЧ на миелиновую оболочку и ионные каналы нервных клеток (в т. ч. апоптоз), на нервные клетки, которое вызывает изменения в генах, белках и пролиферации в нервных клетках, а также физиологические изменения в клеточных мембранах и ионных каналах на клеточном уровне, аутофагию и т. д. Однако авторы отмечают, что имеющиеся сведения достаточно противоречивы и требуют дальнейшего изучения [60].

**Заключение.** Можно считать доказанным, что ЭМП, генерируемые устройствами сотовой связи, оказывают негативное влияние на ЦНС

и ее структуры. Это подтверждается результатами экспериментальных исследований *in vitro* и *in vivo*.

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

Особое место занимают исследования, посвященные влиянию ЭМП РЧ на слуховую систему: их результаты указывают на многочисленные морфологические и биохимические изменения, но, как утверждают авторы экспериментальных работ, это не приводит к увеличению порога слышимости.

Использование технологий Wi-Fi также может иметь достаточно широкий круг отрицательных последствий для нервной системы и ее структур. Кроме того, активное продвижение технологий 5G приводит к недооценке спектра их негативного воздействия, поскольку они, как показали исследования, не ограничиваются такими «мишенями», как склера глаз и кожные покровы, а имеют более широкий диапазон влияния, включая нервную систему и различные процессы на молекулярном уровне. Поэтому предложение научной общественности о введении моратория на использование технологий 5G становится еще более актуальным и требует тщательной объективной оценки независимых экспертов.

Полученные результаты потенциально применимы для оценки эффектов воздействия ЭМП РЧ на мозг детей и подростков, а также прогнозирования отдаленных последствий.

Мы полагаем, что назрела необходимость выработки крайне взвешенного подхода к использованию мобильных гаджетов, расположению устройств, генерирующих соответствующие ЭМП РЧ, особенно для подрастающего поколения, о чем неоднократно упоминалось в наших работах.

**Конфликт интересов.** Авторы сообщают об отсутствии конфликта интересов.

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



## Список литературы

1. *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>
2. *Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А.* Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2013. 567 с.
3. *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>
4. *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>
5. *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>
6. *Sonmez O.F., Odaci E., Bas O., Kaplan S.* Purkinje Cell Number Decreases in the Adult Female Rat Cerebellum Following Exposure to 900 MHz Electromagnetic Field // *Brain Res.* 2010. № 1356. P. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.07.103>
7. *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>
8. *Kerimoğlu G., Hancı H., Baş O., Aslan A., Erol H.S., Turgut A., Kaya H., Çankaya S., Sönmez O.F., Odaci E.* Pernicious Effects of Long-Term, Continuous 900-MHz Electromagnetic Field Throughout Adolescence on Hippocampus Morphology, Biochemistry and Pyramidal Neuron Numbers in 60-Day-Old Sprague Dawley Male Rats // *J. Chem. Neuroanat.* 2016. Vol. 77. P. 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2016.07.004>
9. *Shahabi S., Taji I.H., Hoseinnzhaddarzi M., Mousavi F., Shirchi S., Nazari A., Zarei H., Pourabdolhossein F.* Exposure to Cell Phone Radiofrequency Changes Corticotrophin Hormone Levels and Histology of the Brain and Adrenal Glands in Male Wistar Rat // *Iran J. Basic Med. Sci.* 2018. Vol. 21, № 12. P. 1269–1274. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2018.29567.7133>
10. *Şahin A., Aslan A., Baş O., İkinci A., Özyılmaz C., Sönmez O.F., Çolakoğlu S., Odaci E.* Deleterious Impacts of a 900-MHz Electromagnetic Field on Hippocampal Pyramidal Neurons of 8-Week-Old Sprague Dawley Male Rats // *Brain Res.* 2015. Vol. 1624. P. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.07.042>
11. *Keleş A.İ., Nyengaard J.R., Odaci E.* Changes in Pyramidal and Granular Neuron Numbers in the Rat Hippocampus 7 Days After Exposure to a Continuous 900-MHz Electromagnetic Field During Early and Mid-Adolescence // *J. Chem. Neuroanat.* 2019. Vol. 101. Art. № 101681. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2019.101681>
12. *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>
13. *Motawi T.K., Darwish H.A., Moustafa Y.M., Labib M.M.* Biochemical Modifications and Neuronal Damage in Brain of Young and Adult Rats After Long-Term Exposure to Mobile Phone Radiations // *Cell Biochem. Biophys.* 2014. Vol. 70, № 2. P. 845–855. <https://doi.org/10.1007/s12013-014-9990-8>
14. *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>
15. *Mugunthan N., Shanmugasamy K., Anbalagan J., Rajanarayanan S., Meenachi S.* Effects of Long Term Exposure of 900-1800 MHz Radiation Emitted from 2G Mobile Phone on Mice Hippocampus – a Histomorphometric Study // *J. Clin. Diagn. Res.* 2016. Vol. 10, № 8. P. AF01–AF06. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2016/21630.8368>
16. *Bas O., Odaci E., Kaplan S., Acer N., Ucoç K., Colakoglu S.* 900 MHz Electromagnetic Field Exposure Affects Qualitative and Quantitative Features of Hippocampal Pyramidal Cells in the Adult Female Rat // *Brain Res.* 2009. Vol. 1265. P. 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.02.011>

17. Hasan I., Jahan M.R., Islam M.N., Islam M.R. Effect of 2400 MHz Mobile Phone Radiation Exposure on the Behavior and Hippocampus Morphology in Swiss Mouse Model // Saudi J. Biol. Sci. 2022. Vol. 29, № 1. P. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.063>

18. Shahin S., Banerjee S., Singh S.P., Chaturvedi C.M. 2.45 GHz Microwave Radiation Impairs Learning and Spatial Memory via Oxidative/Nitrosative Stress Induced p53-Dependent/Independent Hippocampal Apoptosis: Molecular Basis and Underlying Mechanism // Toxicol. Sci. 2015. Vol. 148, № 2. P. 380–399. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv205>

19. Shahin S., Banerjee S., Swarup V., Singh S.P., Chaturvedi C.M. From the Cover: 2.45-GHz Microwave Radiation Impairs Hippocampal Learning and Spatial Memory: Involvement of Local Stress Mechanism-Induced Suppression of iGluR/ERK/CREB Signaling // Toxicol. Sci. 2018. Vol. 161, № 2. P. 349–374. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfx221>

20. 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>

21. 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>

22. 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>

23. 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>

24. 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, № 12. P. 1072–1079. <https://doi.org/10.1179/1743132814y.0000000392>

25. Singh K.V., Prakash C., Nirala J.P., Nanda R.K., Rajamani P. Acute Radiofrequency Electromagnetic Radiation Exposure Impairs Neurogenesis and Causes Neuronal DNA Damage in the Young Rat Brain // Neurotoxicology. 2023. Vol. 94. P. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2022.11.001>

26. 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>

27. 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>

28. Пчицкая Е.И., Крылов И.С., Власова О.Л., Болсуновская М.В., Безпрозванный И.Б. Переход от классического деления дендритных шипиков нейронов на типы к альтернативным методам анализа // Науч.-техн. вед. СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2019. Т. 12, № 2. С. 88–100. <https://doi.org/10.18721/JPM.12207>

29. Sharma A., Shrivastava S., Shukla S. Exposure of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Biochemical and Pathological Alterations // Neurol. India. 2020. Vol. 68, № 5. P. 1092–1100. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.294554>

30. 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>

31. Eser O., Songur A., Aktas C., Karavelioglu E., Caglar V., Aylak F., Ozguner F., Kanter M. The Effect of Electromagnetic Radiation on the Rat Brain: An Experimental Study // Turk. Neurosurg. 2013. Vol. 23, № 6. P. 707–715. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.jtn.7088-12.2>

32. Aslan A., İkinci A., Baş O., Sönmez O.F., Kaya H., Odacı E. Long-Term Exposure to a Continuous 900 MHz Electromagnetic Field Disrupts Cerebellar Morphology in Young Adult Male Rats // Biotech. Histochem. 2017. Vol. 92, № 5. P. 324–330. <https://doi.org/10.1080/10520295.2017.1310295>

33. Ibitayo A.O., Afolabi O.B., Akinyemi A.J., Ojiezeh T.I., Adekoya K.O., Ojewunmi O.O. RAPD Profiling, DNA Fragmentation, and Histomorphometric Examination in Brains of Wistar Rats Exposed to Indoor 2.5 Ghz Wi-Fi Devices Radiation // Biomed. Res. Int. 2017. Vol. 2017. Art. № 8653286. <https://doi.org/10.1155/2017/8653286>

34. *Sistani S., Fatemi I., Shafeie S.A., Kaeidi A., Azin M., Shamsizadeh A.* The Effect of Wi-Fi Electromagnetic Waves on Neuronal Response Properties in Rat Barrel Cortex // *Somatosens. Mot. Res.* 2019. Vol. 36, № 4. P. 292–297. <https://doi.org/10.1080/08990220.2019.1689116>
35. *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>
36. *Court-Kowalski S., Finnie J.W., Manavis J., Blumbergs P.C., Helps S.C., Vink R.* Effect of Long-Term (2 Years) Exposure of Mouse Brains to Global System for Mobile Communication (GSM) Radiofrequency Fields on Astrocytic Immunoreactivity // *Bioelectromagnetics.* 2015. Vol. 36, № 3. P. 245–250. <https://doi.org/10.1002/bem.21891>
37. *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 900MHz 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>
38. *Mercantepe T., Tümkaya L., Gökçe M.F., Topal Z.S., Esmer E.* Effect of 900-MHz Electromagnetic Field on the Cerebellum: A Histopathological Investigation // *Sisli Etfal Hastan Tıp. Bul.* 2018. Vol. 52, № 2. P. 129–134. <https://doi.org/10.14744/semb.2018.42275>
39. *Kim J.H., Kim H.-J., Yu D.-H., Kweon H.-S., Huh Y.H., Kim H.R.* Changes in Numbers and Size of Synaptic Vesicles of Cortical Neurons Induced by Exposure to 835 MHz Radiofrequency-Electromagnetic Field // *PLoS One.* 2017. Vol. 12, № 10. Art. № e0186416. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186416>
40. *Kim J.H., Lee C.-H., Kim H.-G., Kim H.R.* Decreased Dopamine in Striatum and Difficult Locomotor Recovery from MPTP Insult After Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9, № 1. Art. № 1201. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37874-z>
41. *Kim J.H., Huh Y.H., Kim H.R.* Trafficking of Synaptic Vesicles Is Changed at the Hypothalamus by Exposure to an 835 MHz Radiofrequency Electromagnetic Field // *Gen. Physiol. Biophys.* 2019. Vol. 38, № 5. P. 379–388. [https://doi.org/10.4149/gpb\\_2019020](https://doi.org/10.4149/gpb_2019020)
42. *Alekseev S.I., Gordiienko O.V., Radzievsky A.A., Ziskin M.C.* Millimeter Wave Effects on Electrical Responses of the Sural Nerve *in vivo* // *Bioelectromagnetics.* 2010. Vol. 31, № 3. P. 180–190. <https://doi.org/10.1002/bem.20547>
43. *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.
44. *Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В.* Изменение параметров простой слухо-моторной реакции детей-пользователей мобильной связью: лонгитюдное исследование // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2012. Т. 52, № 3. С. 282–292.
45. *Özgür A., Tümkaya L., Terzi S., Kalkan Y., Erdivanlı Ö.Ç., Dursun E.* Effects of Chronic Exposure to Electromagnetic Waves on the Auditory System // *Acta Otolaryngol.* 2015. Vol. 135, № 8. P. 765–770. <https://doi.org/10.3109/00016489.2015.1032434>
46. *Çeliker M., Özgür A., Tümkaya L., Terzi S., Yılmaz M., Kalkan Y., Erdoğan E.* Effects of Exposure to 2100MHz GSM-Like Radiofrequency Electromagnetic Field on Auditory System of Rats // *Braz. J. Otorhinolaryngol.* 2017. Vol. 83, № 6. P. 691–696. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2016.10.004>
47. *Kim J.H., Huh Y.H., Lee J.-H., Jung J.Y., Ahn S.C., Kim H.R.* Early Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at 1850 MHz Affects Auditory Circuits in Early Postnatal Mice // *Sci. Rep.* 2019. Vol. 9, № 1. Art. № 377. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36868-1>
48. *Lin Y., Gao P., Guo Y., Chen Q., Lang H., Guo Q., Miao X., Li J., Zeng L., Guo G.* Effects of Long-Term Exposure to L-Band High-Power Microwave on the Brain Function of Male Mice // *Biomed. Res. Int.* 2021. Vol. 2021. Art. № 2237370. <https://doi.org/10.1155/2021/2237370>
49. *Yorgancilar E., Dasdag S., Akdag M.Z., Akkus Z., Akdag M., Topcu I.* Does All-Day and Long-Term Exposure to Radiofrequency Radiation Emitted from Wi-Fi Affect Hearing? // *Biotechnol. Biotechnol. Equip.* 2017. Vol. 31, № 6. P. 1204–1209. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1373033>
50. *Yang H., Zhang Y., Wu X., Gan P., Luo X., Zhong S., Zuo W.* Effects of Acute Exposure to 3500 MHz (5G) Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Anxiety-Like Behavior and the Auditory Cortex in Guinea Pigs // *Bioelectromagnetics.* 2022. Vol. 43, № 2. P. 106–118. <https://doi.org/10.1002/bem.22388>

51. 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, № 1. Art. № 34. <https://doi.org/10.1186/s12964-022-01011-1>

52. Ertilav K., Uslusoy F., Ataizi S., Naziroğlu M. Long Term Exposure to Cell Phone Frequencies (900 and 1800 MHz) Induces Apoptosis, Mitochondrial Oxidative Stress and TRPV1 Channel Activation in the Hippocampus and Dorsal Root Ganglion of Rats // *Metab. Brain Dis.* 2018. Vol. 33, № 3. P. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s11011-017-0180-4>

53. Varghese R., Majumdar A., Kumar G., Shukla A. Rats Exposed to 2.45GHz 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>

54. Kim J.H., Yu D.-H., Kim H.R. Activation of Autophagy at Cerebral Cortex and Apoptosis at Brainstem Are Differential Responses to 835 MHz RF-EMF Exposure // *Korean J. Physiol. Pharmacol.* 2017. Vol. 21, № 2. P. 179–188. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2017.21.2.179>

55. Зенков Н.К., Чечушков А.В., Кожин П.М., Мартинович Г.Г., Кандалицева Н.В., Меньщикова Е.Б. Аутофагия как механизм защиты при окислительном стрессе // *Бюл. сиб. медицины.* 2019. Т. 18, № 2. С. 195–214. <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-2-195-214>

56. Ковалева О.В., Шитова М.С., Зборовская И.Б. Аутофагия: клеточная гибель или способ выживания? // *Клин. онкогематология. Фундам. исслед. и клин. практика.* 2014. Т. 7, № 2. С. 103–113.

57. Joushomme A., Garenne A., Dufossée M., Renom R., Ruigrok H.J., Chappe Y.L., Canovi A., Patrignoni L., Hurtier A., Poullietier de Gannes F., Lagroye I., Lévêque P., Lewis N., Priault M., Arnaud-Cormos D., Percherancier Y. Label-Free Study of the Global Cell Behavior During Exposure to Environmental Radiofrequency Fields in the Presence or Absence of Pro-Apoptotic or Pro-Autophagic Treatments // *Int. J. Mol. Sci.* 2022. Vol. 23, № 2. Art. № 658. <https://doi.org/10.3390/ijms23020658>

58. Kim J.H., Huh Y.H., Kim H.R. Induction of Autophagy in the Striatum and Hypothalamus of Mice After 835 MHz Radiofrequency Exposure // *PLoS One.* 2016. Vol. 11, № 4. Art. № e0153308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153308>

59. Kim J.H., Sohn U.D., Kim H.-G., Kim H.R. Exposure to 835 MHz RF-EMF Decreases the Expression of Calcium Channels, Inhibits Apoptosis, but Induces Autophagy in the Mouse Hippocampus // *Korean J. Physiol. Pharmacol.* 2018. Vol. 22, № 3. P. 277–289. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2018.22.3.277>

60. 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. (Seoul).* 2019. Vol. 27, № 3. P. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>

## References

1. 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>

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

3. 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>

4. 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>

5. 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>

6. Sonmez O.F., Odaci E., Bas O., Kaplan S. Purkinje Cell Number Decreases in the Adult Female Rat Cerebellum Following Exposure to 900 MHz Electromagnetic Field. *Brain Res.*, 2010, no. 1356, pp. 95–101. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2010.07.103>

7. 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>
8. Kerimoğlu G., Hancı H., Baş O., Aslan A., Erol H.S., Turgut A., Kaya H., Çankaya S., Sönmez O.F., Odacı E. Pernicious Effects of Long-Term, Continuous 900-MHz Electromagnetic Field Throughout Adolescence on Hippocampus Morphology, Biochemistry and Pyramidal Neuron Numbers in 60-Day-Old Sprague Dawley Male Rats. *J. Chem. Neuroanat.*, 2016, vol. 77, pp. 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2016.07.004>
9. Shahabi S., Taji I.H., Hoseinnehaddarzi M., Mousavi F., Shirchi S., Nazari A., Zarei H., Pourabdolhossein F. Exposure to Cell Phone Radiofrequency Changes Corticotrophin Hormone Levels and Histology of the Brain and Adrenal Glands in Male Wistar Rat. *Iran J. Basic Med. Sci.*, 2018, vol. 21, no. 12, pp. 1269–1274. <https://doi.org/10.22038/ijbms.2018.29567.7133>
10. Şahin A., Aslan A., Baş O., İkinci A., Özyılmaz C., Sönmez O.F., Çolakoğlu S., Odacı E. Deleterious Impacts of a 900-MHz Electromagnetic Field on Hippocampal Pyramidal Neurons of 8-Week-Old Sprague Dawley Male Rats. *Brain Res.*, 2015, vol. 1624, pp. 232–238. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2015.07.042>
11. Keleş A.İ., Nyengaard J.R., Odacı E. Changes in Pyramidal and Granular Neuron Numbers in the Rat Hippocampus 7 Days After Exposure to a Continuous 900-MHz Electromagnetic Field During Early and Mid-Adolescence. *J. Chem. Neuroanat.*, 2019, vol. 101. Art. no. 101681. <https://doi.org/10.1016/j.jchemneu.2019.101681>
12. 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>
13. Motawi T.K., Darwish H.A., Moustafa Y.M., Labib M.M. Biochemical Modifications and Neuronal Damage in Brain of Young and Adult Rats After Long-Term Exposure to Mobile Phone Radiations. *Cell Biochem. Biophys.*, 2014, vol. 70, no. 2, pp. 845–855. <https://doi.org/10.1007/s12013-014-9990-8>
14. 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>
15. Mugunthan N., Shanmugasamy K., Anbalagan J., Rajanarayanan S., Meenachi S. Effects of Long Term Exposure of 900-1800 MHz Radiation Emitted from 2G Mobile Phone on Mice Hippocampus – a Histomorphometric Study. *J. Clin. Diagn. Res.*, 2016, vol. 10, no. 8, pp. AF01–AF06. <https://doi.org/10.7860/jcdr/2016/21630.8368>
16. Bas O., Odacı E., Kaplan S., Acer N., Uçok K., Colakoglu S. 900 MHz Electromagnetic Field Exposure Affects Qualitative and Quantitative Features of Hippocampal Pyramidal Cells in the Adult Female Rat. *Brain Res.*, 2009, vol. 1265, pp. 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2009.02.011>
17. Hasan I., Jahan M.R., Islam M.N., Islam M.R. Effect of 2400 MHz Mobile Phone Radiation Exposure on the Behavior and Hippocampus Morphology in Swiss Mouse Model. *Saudi J. Biol. Sci.*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.08.063>
18. Shahin S., Banerjee S., Singh S.P., Chaturvedi C.M. 2.45 GHz Microwave Radiation Impairs Learning and Spatial Memory via Oxidative/Nitrosative Stress Induced p53-Dependent/Independent Hippocampal Apoptosis: Molecular Basis and Underlying Mechanism. *Toxicol. Sci.*, 2015, vol. 148, no. 2, pp. 380–399. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfv205>
19. Shahin S., Banerjee S., Swarup V., Singh S.P., Chaturvedi C.M. From the Cover: 2.45-GHz Microwave Radiation Impairs Hippocampal Learning and Spatial Memory: Involvement of Local Stress Mechanism-Induced Suppression of iGluR/ERK/CREB Signaling. *Toxicol. Sci.*, 2018, vol. 161, no. 2, pp. 349–374. <https://doi.org/10.1093/toxsci/kfx221>
20. 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>
21. 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>
22. 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>

23. 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>
24. 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>
25. Singh K.V., Prakash C., Nirala J.P., Nanda R.K., Rajamani P. Acute Radiofrequency Electromagnetic Radiation Exposure Impairs Neurogenesis and Causes Neuronal DNA Damage in the Young Rat Brain. *Neurotoxicology*, 2023, vol. 94, pp. 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.neuro.2022.11.001>
26. 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>
27. 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>
28. Pchitskaya E.I., Krylov I.S., Vlasova O.L., Bolsunovskaya M.V., Bezprozvanny I.B. Analysis of Dendritic Spines Morphology: From Classical Division to Types Toward Alternative Approaches. *St. Petersburg Polytech. State Univ. J. Phys. Math.*, 2019, vol. 12, no. 2, pp. 88–100 (in Russ.). <https://doi.org/10.18721/JPM.12207>
29. Sharma A., Shrivastava S., Shukla S. Exposure of Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Biochemical and Pathological Alterations. *Neurol. India*, 2020, vol. 68, no. 5, pp. 1092–1100. <https://doi.org/10.4103/0028-3886.294554>
30. 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>
31. Eser O., Songur A., Aktas C., Karavelioglu E., Caglar V., Aylak F., Ozguner F., Kanter M. The Effect of Electromagnetic Radiation on the Rat Brain: An Experimental Study. *Turk. Neurosurg.*, 2013, vol. 23, no. 6, pp. 707–715. <https://doi.org/10.5137/1019-5149.jtn.7088-12.2>
32. Aslan A., İkinci A., Baş O., Sönmez O.F., Kaya H., Odacı E. Long-Term Exposure to a Continuous 900 MHz Electromagnetic Field Disrupts Cerebellar Morphology in Young Adult Male Rats. *Biotech. Histochem.*, 2017, vol. 92, no. 5, pp. 324–330. <https://doi.org/10.1080/10520295.2017.1310295>
33. Ibitayo A.O., Afolabi O.B., Akinyemi A.J., Ojiezeh T.I., Adekoya K.O., Ojewunmi O.O. RAPD Profiling, DNA Fragmentation, and Histomorphometric Examination in Brains of Wistar Rats Exposed to Indoor 2.5 Ghz Wi-Fi Devices Radiation. *Biomed. Res. Int.*, 2017, vol. 2017. Art. no. 8653286. <https://doi.org/10.1155/2017/8653286>
34. Sistani S., Fatemi I., Shafeie S.A., Kaeidi A., Azin M., Shamsizadeh A. The Effect of Wi-Fi Electromagnetic Waves on Neuronal Response Properties in Rat Barrel Cortex. *Somatosen. Mot. Res.*, 2019, vol. 36, no. 4, pp. 292–297. <https://doi.org/10.1080/08990220.2019.1689116>
35. 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>
36. Court-Kowalski S., Finnie J.W., Manavis J., Blumbergs P.C., Helps S.C., Vink R. Effect of Long-Term (2 Years) Exposure of Mouse Brains to Global System for Mobile Communication (GSM) Radiofrequency Fields on Astrocytic Immunoreactivity. *Bioelectromagnetics*, 2015, vol. 36, no. 3, pp. 245–250. <https://doi.org/10.1002/bem.21891>
37. 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>
38. Mercantepe T., Tümkaya L., Gökçe M.F., Topal Z.S., Esmer E. Effect of 900-MHz Electromagnetic Field on the Cerebellum: A Histopathological Investigation. *Sisli Etfal Hastan Tip. Bul.*, 2018, vol. 52, no. 2, pp. 129–134. <https://doi.org/10.14744/semb.2018.42275>
39. Kim J.H., Kim H.-J., Yu D.-H., Kweon H.-S., Huh Y.H., Kim H.R. Changes in Numbers and Size of Synaptic Vesicles of Cortical Neurons Induced by Exposure to 835 MHz Radiofrequency-Electromagnetic Field. *PLoS One*, 2017, vol. 12, no. 10. Art. no. e0186416. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186416>

40. Kim J.H., Lee C.-H., Kim H.-G., Kim H.R. Decreased Dopamine in Striatum and Difficult Locomotor Recovery from MPTP Insult After Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, no. 1. Art. no. 1201. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37874-z>
41. Kim J.H., Huh Y.H., Kim H.R. Trafficking of Synaptic Vesicles Is Changed at the Hypothalamus by Exposure to an 835 MHz Radiofrequency Electromagnetic Field. *Gen. Physiol. Biophys.*, 2019, vol. 38, no. 5, pp. 379–388. [https://doi.org/10.4149/gpb\\_2019020](https://doi.org/10.4149/gpb_2019020)
42. Alekseev S.I., Gordiienko O.V., Radzievsky A.A., Ziskin M.C. Millimeter Wave Effects on Electrical Responses of the Sural Nerve *in vivo*. *Bioelectromagnetics*, 2010, vol. 31, no. 3, pp. 180–190. <https://doi.org/10.1002/bem.20547>
43. 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.
44. Khorseva N.I., Grigor'ev Yu.G., Gorbunova N.V. Izmenenie parametrov prostoy slukho-motornoy reaksii detey-pol'zovateley mobil'noy svyaz'yu: longityudnoe issledovanie [Changes in the Parameters of the Simple Auditory-Motor Response in Children Users of Mobile Communication: Longitudinal Study]. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 282–292.
45. Özgür A., Tümkaya L., Terzi S., Kalkan Y., Erdivanlı Ö.Ç., Dursun E. Effects of Chronic Exposure to Electromagnetic Waves on the Auditory System. *Acta Otolaryngol.*, 2015, vol. 135, no. 8, pp. 765–770. <https://doi.org/10.3109/00016489.2015.1032434>
46. Çeliker M., Özgür A., Tümkaya L., Terzi S., Yılmaz M., Kalkan Y., Erdoğan E. Effects of Exposure to 2100MHz GSM-Like Radiofrequency Electromagnetic Field on Auditory System of Rats. *Braz. J. Otorhinolaryngol.*, 2017, vol. 83, no. 6, pp. 691–696. <https://doi.org/10.1016/j.bjorl.2016.10.004>
47. Kim J.H., Huh Y.H., Lee J.-H., Jung J.Y., Ahn S.C., Kim H.R. Early Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields at 1850 MHz Affects Auditory Circuits in Early Postnatal Mice. *Sci. Rep.*, 2019, vol. 9, no. 1. Art. no. 377. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-36868-1>
48. Lin Y., Gao P., Guo Y., Chen Q., Lang H., Guo Q., Miao X., Li J., Zeng L., Guo G. Effects of Long-Term Exposure to L-Band High-Power Microwave on the Brain Function of Male Mice. *Biomed. Res. Int.*, 2021, vol. 2021. Art. no. 2237370. <https://doi.org/10.1155/2021/2237370>
49. Yorgancilar E., Dasdag S., Akdag M.Z., Akkus Z., Akdag M., Topcu I. Does All-Day and Long-Term Exposure to Radiofrequency Radiation Emitted from Wi-Fi Affect Hearing? *Biotechnol. Biotechnol. Equip.*, 2017, vol. 31, no. 6, pp. 1204–1209. <https://doi.org/10.1080/13102818.2017.1373033>
50. Yang H., Zhang Y., Wu X., Gan P., Luo X., Zhong S., Zuo W. Effects of Acute Exposure to 3500 MHz (5G) Radiofrequency Electromagnetic Radiation on Anxiety-Like Behavior and the Auditory Cortex in Guinea Pigs. *Bioelectromagnetics*, 2022, vol. 43, no. 2, pp. 106–118. <https://doi.org/10.1002/bem.22388>
51. 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, no. 1. Art. no. 34. <https://doi.org/10.1186/s12964-022-01011-1>
52. Ertilav K., Uslusoy F., Ataizi S., Nazıroğlu M. Long Term Exposure to Cell Phone Frequencies (900 and 1800 MHz) Induces Apoptosis, Mitochondrial Oxidative Stress and TRPV1 Channel Activation in the Hippocampus and Dorsal Root Ganglion of Rats. *Metab. Brain Dis.*, 2018, vol. 33, no. 3, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s11011-017-0180-4>
53. Varghese R., Majumdar A., Kumar G., Shukla A. Rats Exposed to 2.45GHz 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>
54. Kim J.H., Yu D.-H., Kim H.R. Activation of Autophagy at Cerebral Cortex and Apoptosis at Brainstem Are Differential Responses to 835 MHz RF-EMF Exposure. *Korean J. Physiol. Pharmacol.*, 2017, vol. 21, no. 2, pp. 179–188. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2017.21.2.179>
55. Zenkov N.K., Chehushkov A.V., Kozhin P.M., Martinovich G.G., Kandalintseva N.V., Menshchikova E.B. Autophagy as a Protective Mechanism in Oxidative Stress. *Bull. Sib. Med.*, 2019, vol. 18, no. 2, pp. 195–214 (in Russ.). <https://doi.org/10.20538/1682-0363-2019-2-195-214>

56. Kovaleva O.B., Shitova M.S., Zborovskaya I.B. Autofagiya: kletchnaya gibel' ili sposob vyzhivaniya? [Autophagy: Cell Death or Survival Strategy?]. *Klinicheskaya onkogematologiya. Fundamental'nye issledovaniya i klinicheskay praktika*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 103–113.

57. Joushomme A., Garenne A., Dufossée M., Renom R., Ruigrok H.J., Chappe Y.L., Canovi A., Patrignoni L., Hurtier A., Poulliet de Gannes F., Lagroye I., Lévêque P., Lewis N., Priault M., Arnaud-Cormos D., Percherancier Y. Label-Free Study of the Global Cell Behavior During Exposure to Environmental Radiofrequency Fields in the Presence or Absence of Pro-Apoptotic or Pro-Autophagic Treatments. *Int. J. Mol. Sci.*, 2022, vol. 23, no. 2. Art. no. 658. <https://doi.org/10.3390/ijms23020658>

58. Kim J.H., Huh Y.H., Kim H.R. Induction of Autophagy in the Striatum and Hypothalamus of Mice After 835 MHz Radiofrequency Exposure. *PLoS One*, 2016, vol. 11, no. 4. Art. no. e0153308. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153308>

59. Kim J.H., Sohn U.D., Kim H.-G., Kim H.R. Exposure to 835 MHz RF-EMF Decreases the Expression of Calcium Channels, Inhibits Apoptosis, but Induces Autophagy in the Mouse Hippocampus. *Korean J. Physiol. Pharmacol.*, 2018, vol. 22, no. 3, pp. 277–289. <https://doi.org/10.4196/kjpp.2018.22.3.277>

60. 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. (Seoul)*, 2019, vol. 27, no. 3, pp. 265–275. <https://doi.org/10.4062/biomolther.2018.152>

*Поступила в редакцию 19.09.2023 / Одобрена после рецензирования 20.12.2023 / Принята к публикации 25.12.2023.*

*Submitted 19 September 2023 / Approved after reviewing 20 December 2023 / Accepted for publication 25 December 2023.*