
НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 591.18:599.323.4:636.7:57.084.1:537.86

НЕЙРОМОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ОСТРОГО И ХРОНИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ОБЛУЧЕНИЯ

© 2024 г. И. Б. Ушаков¹, В. П. Федоров², Б. И. Давыдов³

¹Государственный научный центр — Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва, Россия

²Воронежская государственная академия спорта, Воронеж, Россия

³Государственный научный исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины, Москва, Россия

*E-mail: fedor.vp@mail.ru

Поступила в редакцию 03.10.2023 г.

После доработки 20.03.2024 г.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

В модельных экспериментах на трех видах лабораторных животных (мыши, крысы, собаки), подвергшихся как острому, так и хроническому электромагнитному облучению, исследованы морфологические изменения в лобной коре больших полушарий головного мозга. Установлено, что нейроны отличаются высокой реактивностью и в тоже время пластичностью к электромагнитному фактору. Изменения нейронов больше выражены при общем, чем при облучении головы. Наибольший отклик установлен со стороны белоксинтезирующей системы нейронов, а также их межнейронных контактов. Через 3 сут после облучения изменения выявлялись лишь на ультраструктурном уровне в виде остатков распавшихся органелл, скопления лизосом и локальных очагов отека мозга. При хроническом воздействии микроволн с экспозицией на уровне “нулевого эффекта” чувствительность нейронов к электромагнитному облучению характеризовалась видовыми отличиями и находилась в обратной зависимости от массы тела животного: наиболее чувствительны нейроны мышей, более резистентны структуры нервной системы крыс и наименьшей чувствительностью обладали нервные структуры собак.

Ключевые слова: электромагнитные излучения, головной мозг, нейроны, синапсы, гематоэнцефалический барьер, радиочувствительность

DOI: 10.31857/S0869803124030034, EDN: MBPWSP

В последние годы значительно расширился объем вмешательства в природу, грозящий стать глобальной опасностью для всего человечества. Среди множества возникающих при этом проблем значительное место занимают электромагнитные излучения [1–6]. Количество их источников, параметры и режимы воздействия на живые объекты практически не поддаются учету и классификации. Для разработки концепций по обеспечению комплексного решения проблемы защиты от неионизирующих излучений человека и окружающей среды, выработки рекомендаций по уменьшению экономического и социального ущерба и охране здоровья населения 28 января 1997 г. образован Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений. По данным его председателя, “электромагнитные излучения действуют практически круглосуточно, постоянно облучая население.

Идет стремительный рост электромагнитного загрязнения среды с реальным отрицательным прогнозом” [7, 8]. Однако, несмотря на малоизученные аспекты влияния электромагнитных излучений на организм, они уже применяются в клинике, в частности, при сосудистых заболеваниях головного мозга, глаз и т.д. [9]. В последние годы электромагнитные излучения стали использовать и в спортивной практике для повышения физической работоспособности, увеличения мышечной силы и выносливости, а также для “изменения координационной структуры локомоторных движений” и др. [10, 11]. Сторонники такого подхода к практическому использованию микроволн не учитывают научные данные о последствиях влияния микроволн на организм человека и, в частности, на головной мозг [13–18]. Видимо, не знакомы они и с материалами регулярно проводимых Международных

конференций “Человек и электромагнитные поля”, а также с фундаментальными работами отечественных классиков электромагнитобиологии (Прессман, Григорьев, Холодов, Давыдов и др.). Между тем при воздействии электромагнитных излучений даже объектов сотовой связи у человека отмечаются нарушения когнитивных функций, нестабильность поведения в процессе обучения, отклонения со стороны краткосрочной и долгосрочной памяти [6, 7, 19, 20–22]. В ряде исследований подтвержден рост заболеваемости по прогнозным группам болезней в популяции подростков 15–17 лет (злокачественные опухоли, болезни нервной системы, нарушение иммунного статуса, болезни органа слуха и зрения). Последние работы этого направления свидетельствуют о том, что рост заболеваемости, обусловленной вредным влиянием электромагнитного поля, скорее достоверно существует, чем является случайным совпадением [19, 23–25]. Недооценка опасности электромагнитного излучения окружающей среды не способствует принятию государственных мер по изучению патологии, защите, профилактике и контролю загрязнения экосистемы [6–8]. В то же время многочисленные экспериментальные исследования демонстрируют достаточно высокий отклик органов и систем организма на микроволновое воздействие. Особой реактивностью к данному фактору отличается центральная нервная система, но морфологические эквиваленты выявляемых нарушений остаются малоизученными [26–32].

Цель исследования – в модельных экспериментах на лабораторных животных (мыши, крысы, собаки) выявить изменения в коре большого головного мозга после острого и хронического электромагнитного воздействия и определить морфофункциональные структуры, ответственные за реакцию ЦНС на микроволновое воздействие

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Эксперименты проведены в Государственном научно-исследовательском испытательном институте авиационной и космической медицины (ГНИИИАиКМ) с соблюдением национальных и международных требований по содержанию и гуманному обращению с животными (Хельсинкская декларация 2000 г. “О гуманном отношении к животным”; Приказ Минздрава-соцразвития России № 199н от 01.04.2016 г.

“Об утверждении правил лабораторной практики”. Протокол исследования одобрен комиссией по биоэтике ГНИИИАиКМ (протокол № 9 от 12 ноября 2021 г.).

В первой серии экспериментов белых беспородных крыс-самцов массой 250 ± 10 г подвергали в безэховой камере однократному электромагнитному облучению (общее равномерное или только голова) частотой 2.4 ГГц с ППЭ 300 мВт/см² в течение 2, 4 и 6 мин. Облучение было односторонним (латеральным), при этом продольная ось животного была параллельна магнитному вектору электромагнитной волны. При облучении головы экраном для других участков тела служила алюминиевая фольга, что обеспечивало парциальность микроволнового воздействия [9, 27]. Лобную кору (поле FPP) больших полушарий головного мозга экспериментальных ($n = 72$) и контрольных ($n = 18$) животных забирали через 0.1; 2.0 и 72 ч после начала эксперимента.

Во второй серии экспериментов исследовали влияние на головной мозг мышей, крыс и собак хронического воздействия микроволн непрерывной генерации частотой 2.4 ГГц с ППЭ 300 мВт/см² и длиной волны 12.6 см. Экспозиция, с учетом функциональной зависимости между плотностью потока энергии и длительностью микроволнового излучения на уровне “нулевого эффекта”, составляла 52 с для мышей, 2 мин для крыс и 3 мин для собак [2]. Для морфологических исследований забирали лобную кору (поле FPP) через 3 сут от последнего 30-, 60- и 90-разового (мыши, $n = 48$ и крысы, $n = 48$) и 90-разового (собаки, $n = 12$) облучения. Каждому сроку наблюдения соответствовал контроль с ложным облучением ($n = 6$). При всех режимах электромагнитного воздействия ректальная температура экспериментальных животных не менялась.

После стандартных гистологических процедур обзорные срезы лобной коры окрашивали гематоксилин-эозином. На этих препаратах изучали общую картину cito- и ангиоархитектоники. Оценку тинкториальных свойства и морфометрических показателей состояния нервных и глиальных клеток проводили на препаратах, окрашенных крезилвиолетом по методу Ниссля. Общий белок в нейронах выявляли на парафиновых срезах, окрашенных методом сулема-бромфеноловый синий по Бонхеу, а цитоплазматическую РНК – по методу Shea. Состояние ферментативных систем нейронов (дегидрогеназы –

СДГ и ЛДГ, гидролазы — ЩФ и КФ) выявляли на криостатных срезах с использованием стандартных гистохимических методик.

Для электронно-микроскопического исследования участки лобной коры фиксировали методом инфильтрации в 2.5%-ном растворе глутаральдегида на 0.2 моль/л коллидиновом буфере и постфиксировали в 1%-ном растворе осмиевой кислоты. Обезвоживание проводили в этаноле восходящей концентрации с последующей заливкой в эпон-812. Структуру исследуемого объекта предварительно оценивали на полутонких срезах толщиной в 1 мкм окрашенных 1%-ным раствором толуидинового синего на 0.1 моль/л фосфатном буфере (pH 8.6) с последующей заточкой пирамиды. Ультратонкие срезы получали на ультратоме (LKB-III, Швеция), контрастировали по Reynolds и исследовали в электронном микроскопе JEM-100 CX-2 (Япония).

При анализе полученных результатов использовали параметрические методы статистики с вычислением средних и доверительных интервалов с помощью пакетов программ Statistica 6.1, MS Excel. Нулевая гипотеза отвергалась при $p < 0.05$ (t -критерий Стьюдента для парного сравнения независимых выборок между группами). Более подробно алгоритм проведения экспериментов, обработки и анализа материала описан нами в монографии [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование животных с ложным воздействием показало, что возрастная перестройка нейронов коры больших полушарий головного мозга заключалась в изменении на отдельных этапах эксперимента соотношения нейронов находящихся в состоянии покоя (нормохромные), повышения (гипохромные) или торможения (гиперхромные) функциональной активности. С возрастом изменялись размеры тела, цитоплазмы, ядра и ядрышка нейронов, а также прослеживалась тенденция к увеличению их количества с признаками альтерации. Также отмечалась флюктуация содержания в нейронах общего белка, нуклеиновых кислот и энергетического обмена. Эти возрастные изменения необходимо учитывать при оценке морфологических проявлений при пролонгированных электромагнитных воздействиях.

Сразу после общего однократного облучения крыс с ППЭ 300 мВт/см² и экспозицией 2 мин в лобной коре головного мозга уменьшалось

количество неизмененных нейронов и составляло по отношению к контролю всего 31% ($p < 0.05$). Это связано с увеличением количества нейронов, как с альтерацией, так и с измененной функциональной активностью. При парциальном облучении головы в данном режиме количество неизмененных нейронов составило 79.4% от всей нейронной популяции. На этом фоне заметно увеличилось количество нервных клеток с признаками альтерации ($p < 0.05$). Количество нейронов, находящихся в повышенном или сниженном функциональном состоянии, практически соответствовало таковому у животных с ложным воздействием. Примечательно, что при общем облучении количество нейронов с альтеративными изменениями не отличалось от такового при облучении головы, но было больше нейронов с повышенной функциональной активностью. При рассмотренных вариантах микроволнового воздействия, количество нейронов на площади коры статистически значимо не изменялось. Вместе с тем при общем облучении отмечалось значимое снижение показателя нервно-клеточного индекса ($p < 0.05$), что свидетельствовало о более выраженных изменениях в нейронах по сравнению с парциальным облучением головы. Кариометрические исследования выявили разнонаправленные отклики ядер нервных клеток на общее и парциальное микроволновое воздействие — повышение функциональной активности ядер при облучении головы и торможение их функциональной активности при общем воздействии. При этом существенно изменялся характер вариационной кривой распределения объемов ядер по классам логарифмов: смещение влево при общем и вправо при парциальном воздействии (табл. 1).

При импрегнации азотнокислым серебром у части отростков нервных клеток наблюдались участки гипо- и гипераргентофилии, а также неравномерное окрашивание миелиновых оболочек по Вейгерту—Палю, но осмирование препарата по Марки не выявило дегенерацию миелина.

Гистохимические исследования не выявили в нейронах существенных изменений содержания белка и РНК. Активность дегидрогеназ при общем воздействии имела тенденцию к повышению: СДГ на 9% и ЛДГ на 12%, а при облучении головы не изменялась. Более заметным было изменение активности гидролаз. Так, при облучении головы активность ЩФ значимо снижалась на 20%, а при общем облучении — повышалась на 45% ($p < 0.05$). При этом продукт реакции

Таблица 1. Характеристика изменений нейронов в лобной коре после однократного электромагнитного облучения ППЭ 300 мВт/см² с экспозицией 2, 4, 6 мин в процентах к контролю

Table 1. Characteristics of changes in neurons in the frontal cortex after a single electromagnetic irradiation of 300 MW/cm² with an exposure of 2, 4, 6 minutes as a percentage of control

Показатели состояния нейронов	2 мин		4 мин		6 мин	
	голова	общее	голова	общее	голова	общее
Нормохромные	40*	31*	42*	29*	28*	19*
Г ипохромные	103	123*	81	91	95	107
Г гиперхромные	102	109	95	104	112	136*
Деструктивные	158*	146*	223*	286*	250*	348*
Нервно-клеточный индекс	91	86*	90	51*	82*	52*
Объем ядер нейронов	121*	70*	111	105	102	89
Активность СДГ	101	109	120	109	98	107
Активность ЛДГ	103	112	106	119	109	108
Активность ЩФ	80	145	133*	63*	82*	52*
Активность КФ	106	117	112	120	121*	119*

неравномерно откладывался в эндотелии микрососудов, а в ряде случаев наблюдалась диффузия его гранул в периваскулярное пространство, что свидетельствовало об изменении трансэндотелиального транспорта. Активность кислой фосфатазы при парциальном облучении практически не изменялась, а при общем — повышалась, но без статистической значимости, на 17% (табл. 1).

Проведенные электронно-микроскопические исследования выявили достаточно гетероморфную картину состояния нервных и глиальных клеток, синапсов и структур гематоэнцефалического барьера. Хотя основная масса нервных клеток не имела функционально значимых ультраструктурных изменений, повсеместно встречались как светлые, так и темные нейроны. В ряде нервных клеток наблюдались очаги дегенерации в виде скопления лизосом и распавшихся органоидов. Цитоплазматическая сеть неравномерно набухала, лишалась рибосом и, распадаясь, образовывала вакуоли и мембранные миелоноподобные комплексы. Часть митохондрий была набухшей, с просветленным матриксом, содержащим продукты распада крист. Постоянно встречались осмиофильные нейроны с неразличимыми границами ядра и массовым набуханием органоидов. Вокруг таких нейронов обычно располагались микроглиоциты, распающиеся

астроциты и формировались локальные очаги отека мозга (рис. 1).

При облучении головы ядра нейронов были увеличены в размере, светлые с равномерно расположенным хроматином. При общем облучении встречались мелкие темные ядра с конденсированным в глыбки хроматином и извитыми контурами кариолеммы. Со стороны специализированных элементов нейронов наблюдался распад нейротрубочек, набухание и различные стадии дегенерации межнейрональных контактов (рис. 2).

Микроциркуляторное русло было неравномерно расширено и переполнено форменными элементами крови. Цитоплазма эндотелия выглядела набухшей, содержала небольшое количество пиноцитозных везикул и распающихся ультраструктур. Прилежащие отростки астроцитов набухали и распадались с формированием локальных очагов периваскулярного отека. В целом при общем и парциальном облучении ультраструктурные изменения в лобной коре были однонаправленными, но при общем воздействии они были более выраженными и гетероморфными.

Через 2 ч после парциального облучения головы увеличивалось количество нервных клеток с альтерацией. Показатель нервно-клеточного индекса снижался ($p < 0.05$), что

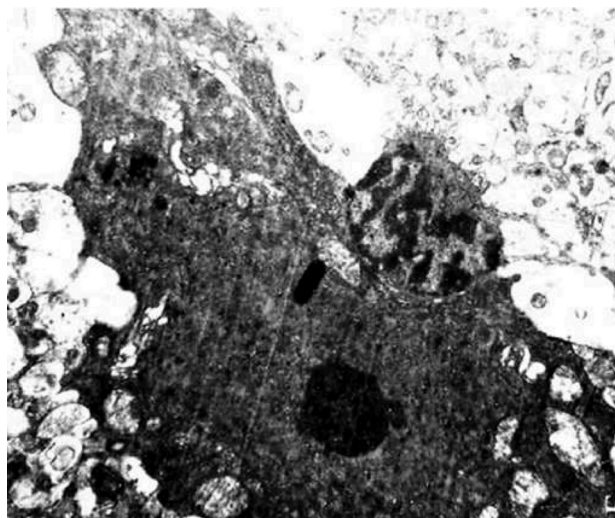


Рис. 1. Лобная кора после электромагнитного облучения головы (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 2 мин). Осмиофильный нейрон с неразличимыми контурами ядра, набуханием и распадом ультраструктур. Нейрон контактирует с микроглиоцитом и вокруг них формируется перичеселлюлярный отек. Электронограмма, $\times 10\,000$.

Fig. 1. Frontal cortex after electromagnetic irradiation of the head (PPE 300 MW/cm², exposure 2 min). An osmiophilic neuron with indistinguishable core contours, swelling and disintegration of ultrastructures. The neuron contacts the microglial cell and pericellular edema forms around them. Electronogram, $\times 10\,000$.

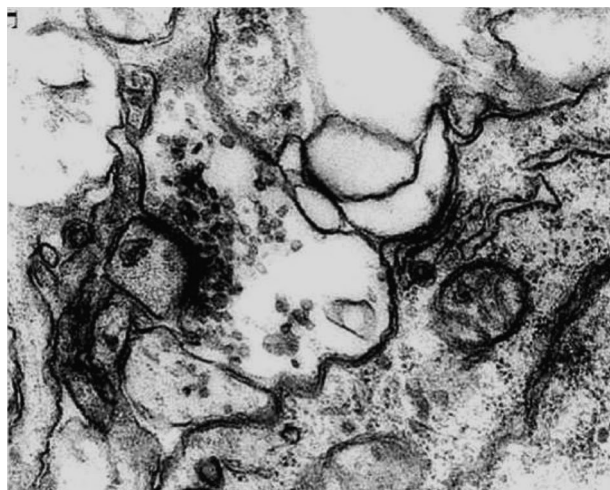


Рис. 2. Лобная кора после электромагнитного облучения головы (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 2 мин). Дегенерация синапсов по светловому типу. В центре аксодендритический синапс в состоянии функционального напряжения. Справа от него — фрагмент темного нейрона с набухшими ультраструктурами. Электронограмма, $\times 40\,000$.

Fig. 2. Frontal cortex after electromagnetic irradiation of the head (PPE 300 MW/cm², exposure 2 min). Degeneration of synapses according to the light type. In the center, the axodendritic synapse is in a state of functional tension. To his right is a fragment of a dark neuron with swollen ultrastructures. Electronogram, $\times 40\,000$.

свидетельствовало о гибели части нейронов, но без значимого обеднения всей нейронной популяции. Среди измененных нейронов встречались пикноморфные клетки и клеточные тени. При общем облучении уменьшалось количество нейронов с обычной структурной организацией и увеличивалось количество нервных клеток с измененной функциональной активностью. Особенно увеличивалось количество нейронов, находящихся в состоянии торможения функциональной активности и, в меньшей степени, с необратимыми изменениями (рис. 3).

Размер ядер нейронов при облучении головы соответствовал таковому в необлученном контроле, а при общем облучении — в предшествующем сроке наблюдения. Содержание белка и активность изученных ферментов не имели различий с таковыми сразу после электромагнитного воздействия. При импрегнации азотнокислым серебром существенные изменения со стороны осевых цилиндров отростков нервных клеток после облучения головы не выявлялись. При общем облучении, наряду с участками гипо- и гипераргентофилии, выявлялись нервные волокна

с неровными контурами и наплывами нейроплазмы, но без распада осевых цилиндров. Миелиновые оболочки неравномерно окрашивались по Вейгерт—Палю, но реакция Марки не выявляла дегенерацию миелина.

Электронно-микроскопические исследования выявили более выраженные и полиморфные изменения состояния нейронов, синапсов, нейроглии, а также структур гематоэнцефалического барьера. Изменения при парциальном облучении в большинстве случаев имели характер функционального напряжения. При общем облучении довольно большое количество нервных клеток имело повышенную осмиофилию ядра и цитоплазмы, встречались также пикноморфные нейроны. Ядра таких клеток были осмиофильными, уменьшенными в размере и с плохо различимыми контурами кариолеммы. Перикарион также имел повышенную осмиофилию с массовым набуханием и распадом органоидов, которые придавали цитоплазме “пенистый” вид. Наибольший отклик на воздействующий фактор отмечен со стороны цитоплазматической сети. Ее цистерны

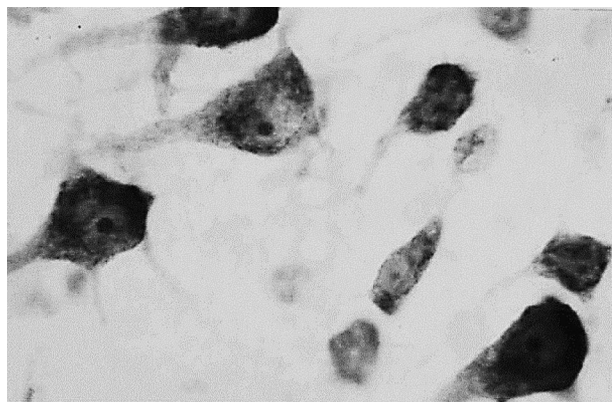


Рис. 3. Лобная кора через 2 ч после общего облучения с ППЭ 300 мВт/см² в течении 2 мин. Преобладают нервные клетки со сниженной функциональной активностью (гиперхромные). Окраска крезилвиолетом по Нисслю, об. 100, ок. 5.

Fig. 3. Frontal cortex 2 hours after total irradiation with 300 MW/cm² PPE for 2 min. Nerve cells with reduced functional activity (hyperchromic) predominate. Cresylviolet painting by Nissl, vol. 100, approx. 5.

неравномерно набухали, она теряла ориентацию и лишалась рибосом. Встречались участки распада цистерн с формированием гетероморфных вакуолей и мембранных комплексов. На этом фоне наблюдались и признаки ее репарации из наружной мембраны кариолеммы в виде выпячиваний с последующим отделением в цитоплазму. Постоянно встречались темные нейроны с лизосомами различной степени зрелости. Прослеживалась также тенденция к сближению глии с нейронами. Большинство межнейрональных контактов не изменялись, но среди их популяции встречались синапсы с альтерацией по светлomu, а при общем облучении — еще и по темному типу. Встречались межнейрональные контакты с набухшим претерминальным отделом и гетероморфным состоянием синаптических везикул. Последние могли быть “склеены” и располагаться как на пресинаптической мембране, так и в центре претерминали. Наблюдались также синапсы с признаками альтерации в постсинаптическом отделе и шипиковом аппарате. При этом их аксональная часть выглядела расширенной и была переполнена везикулами. При общем облучении, кроме альтерации по светлomu типу, встречались синапсы с дегенерацией по темному типу. В ряде случаев претерминали были набухшими, местами утрачивали целостность как пресинаптической, так и постсинаптической мембраны. Синаптическая щель нередко

была заполнена осмиофильным материалом, а активные зоны мембран имели сниженную информативность.

Состояние микроциркуляторного русла в целом соответствовало таковому в предшествующем сроке наблюдения. Микрососуды были неравномерно расширены и местами переполнены форменными элементами крови. При общем облучении встречались участки стаза форменных элементов, а также суженные капилляры — как за счет набухания цитоплазмы, так и ядер эндотелия. Постоянно встречались локальные очаги периваскулярного отека за счет набухания и распада отростков астроцитов. При облучении головы значимые изменения эндотелия и базальной мембраны капилляров не выявлялись. Периваскулярная астроцитарная муфта местами выглядела набухшей с признаками формирующихся локальных отеков.

Через 72 ч после электромагнитного облучения в лобной коре функционально значимых нейроморфологических изменений практически не выявлялось. В основном наблюдались нервные клетки с просветленной цитоплазмой, бледно окрашенным ядром, складчатой кариолеммой и смещенным на периферию ядрышком. В цитоплазме выявлялась мелкочаеистая вакуолизация, а иногда и крупные вакуоли. Встречались гипохромные нейроны, в перикарионе которых наблюдались лишь частично сохраненные глыбки базофильного вещества. Изредка встречались пикноморфные нервные клетки и клетки-тени. Содержание в нейронах белка, РНК и активность изученных ферментов соответствовали таковым в контроле. Объем ядер малых пирамидных нейронов III слоя лобной коры не отличался от исходного уровня, а у больших пирамидных нейронов V слоя он оставался сниженным, что свидетельствовало об их функциональной недостаточности.

Ультраструктурное исследование выявило в цитоплазме нервных клеток неравномерно расширенные цистерны цитоплазматической сети и митохондрии с просветленным матриксом, а также большое количество лизосом в зоне аппарата Гольджи. В последнем наблюдалась трансформация ламеллярных структур в везикулярные, что при световой микроскопии имело вид мелкочаеистой вакуолизации цитоплазмы. Большинство межнейрональных контактов сохраняли обычную структурную организацию, но встречались синапсы с различными альтеративными изменениями. В периваскулярной

и перичеселлюлярной зонах сохранялись остатки распавшихся астроцитов и очагов локального отека мозга.

Увеличение энергетической экспозиции до 4 и 6 мин при общем воздействии приводило к гибели животных “под лучом” или сразу после окончания облучения. При парциальном облучении головы не наблюдалось изменений количества нервных клеток с функциональными изменениями, а статистически значимо увеличивалось количество нейронов с альтерацией по типу коагуляционного некроза (пикноморфные нейроны). Особенно заметно изменялись аргентофильные свойства отростков нейронов. Наряду с участками гипо- и гипераргентофилии выявлялись участки осевых цилиндров с неровными контурами, наплывами нейроплазмы и зернистым распадом. Миелиновые оболочки неравномерно окрашивались по Вейгерт–Палю и имели неровные контуры, но очагов дегенерации миелина не встречалось. Наблюдалось усиление реакции при выявлении в нейронах общего белка, а нередко продукты реакции образовывали в цитоплазме грубые гетерогенные гранулы и их конгломераты, делая неразличимыми границы ядра и перикариона. Примечательно, что при данных режимах электромагнитного облучения ядра нервных клеток утратили способность реагировать на микроволновое воздействие изменением своего функционального состояния.

На ультраструктурном уровне изменения были более выраженными, чем при экспозиции 2 мин. Значительное количество нейронов имело повышенную осмиофилию ядра и цитоплазмы с дегенерирующими органеллами. Выявлялись нейроны с кариопикнозом и гомогенизированной цитоплазмой. Среди органоидов наибольшие изменения отмечались со стороны цитоплазматической сети. Она набухала, утрачивала рибосомы и фрагментировалась с образованием различных вакуолей или закручивалась в миеліноподобные мембранные комплексы. Митохондрии еще не успевали, видимо, среагировать на воздействующий фактор, так как большинство их имели обычное строение. Наиболее существенные изменения, способные нарушать интегративную деятельность нервных клеток, выявлялись со стороны синапсов. Их изменения происходили, как правило, по светлomu типу. При этом наблюдалось набухание с просветлением аксональной части синапсов, уменьшение в них количества везикул и гипертрофия прилежащей астроцитарной нейроглии. Нередко

наблюдалось снижение информативности и нарушение целостности активных зон мембран пресинаптических отделов. В отдельных участках средних слоев коры наблюдалась массовая дегенерация синапсов. Гипертрофия астроцитов встречалась не только вокруг распадающихся синапсов, но и вокруг нервных клеток и структур микроциркуляторного русла с формированием локальных очагов периваскулярных и перичеселлюлярных отеков. Микроциркуляторное русло было неравномерно расширено и переполнено форменными элементами крови. Эндотелий капилляров выглядел набухшим, содержал распадающиеся ультраструктуры и умеренное количество пиноцитозных везикул. Плотные контакты эндотелиоцитов сохраняли обычную ультраструктурную организацию. Наблюдалось достаточно выраженное набухание и распад астроцитов с формированием очагов перичеселлюлярного и периваскулярного отека, распространяющихся на нейропил (рис. 4).

Таким образом, нейроны лобной коры головного мозга отличались как высокой реактивностью, так и пластичностью к электромагнитному фактору. Наибольший отклик выявлен со стороны структур белоксинтезирующей системы, а также межнейрональных контактов. Через 72 ч после воздействия изменения выявлялись лишь на ультраструктурном уровне в виде фрагментов распавшихся органелл, скопления лизосом различной степени зрелости, а также локальных очагов периваскулярного и перичеселлюлярного отека. Увеличение энергетической экспозиции при общем облучении приводило к гибели животных практически “под лучом”, а при парциальном воздействии вызывало выраженную альтерацию нейронов, нейроглии, синапсов и структур гематоэнцефалического барьера с формированием обширных периваскулярных и перичеселлюлярных отеков мозга и неблагоприятным прогнозом для жизни.

При хроническом электромагнитном облучении (ППЭ = 300 мВт/см², длина волны 12.6 см и экспозицией на уровне “нулевого эффекта”, т.е. 52 с для мышей, 2 мин для крыс и 3 мин для собак) существенных отклонений функциональных и лабораторных показателей от аналогичных у контрольной группы животных не установлено. При морфологическом исследовании мышей подвергшихся 30-разовому воздействию микроволнами большинство нейронов лобной коры (76%) сохраняли обычную структурно-функциональную организацию. На

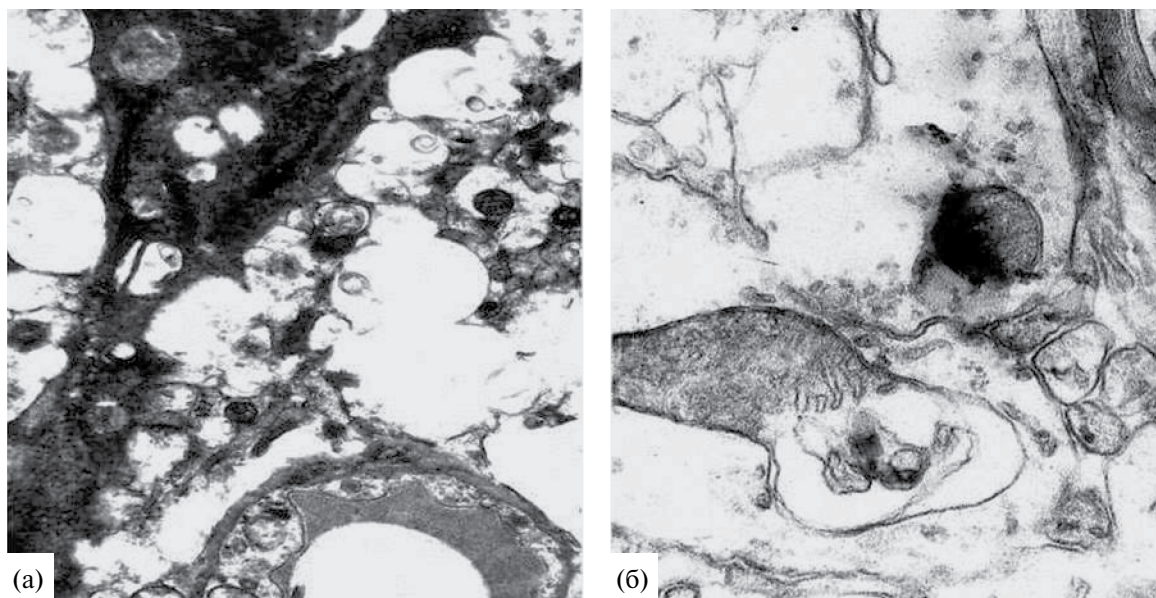


Рис. 4. Лобная кора крысы после облучения головы с ППЭ 300 м/Вт/см² в течение 6 мин. (а) — фрагментация пикноморфного нейрона. Неравномерное набухание эндотелия капилляра с распадом ультраструктур. Набухание и распад отростков астроцитов с формированием отека мозга. Электронограмма, $\times 16\,000$; (б) — нейропилль. Дегенерация синапсов по светлomu типу. Электронограмма, $\times 40\,000$.

Fig. 4. The frontal cortex of a rat after irradiation of the head with a PPE of 300 m/W/cm² for 6 min. (a) — fragmentation of the pycnomorphic neuron. Uneven swelling of capillary endothelium with disintegration of ultrastructures. Swelling and decay of astrocyte processes with the formation of cerebral edema. Electronogram, $\times 16\,000$; (b) — neuropile. Degeneration of synapses according to the light type. Electronogram, $\times 40\,000$.

этом фоне встречались нервные клетки с различными видами хроматолиза и вакуолизацией цитоплазмы, а также гиперхромные и пикноморфные нейроны. Отростки нервных клеток и их миелиновые оболочки были не изменены. Наблюдалось статистически значимое снижение объема ядер в нейронах ($p < 0.01$) со смещением вариационной кривой их распределения по классам логарифмов влево, что свидетельствовало о снижении их функциональной активности. Нервно-клеточный индекс по отношению к контролю был статистически значимо снижен, что свидетельствовало о гибели части нейронов, но без статистически значимого снижения их количества на площади коры.

Электронно-микроскопические исследования выявили признаки нарушения ультраструктурной организации у достаточно большого количества нервных клеток. Изменения затрагивали практически все компоненты нейронов, но больше они были выражены со стороны белоксинтезирующей и энергетической систем. В ряде нейронов гранулярная цитоплазматическая сеть была расширена и местами лишена рибосом. Ядра были уменьшены в объеме,

имели складчатый контур кариолеммы с конденсированным на внутренней поверхности хроматином. Митохондрии имели просветленный матрикс, а нередко и распавшиеся кристы. Встречались и мелкие с уплотненным матриксом, а также практически не измененные митохондрии. Наблюдалась очаги внутриклеточной альтерации, представляющие собой продукты распада органоидов: митохондрий, цитоплазматической сети и пластинчатого комплекса Гольджи. Как правило, рядом с такими очагами находились лизосомы различной степени зрелости (рис. 5).

При 60-разовом электромагнитном облучении мышей состояние нейронов лобной коры по сравнению с 30-разовым воздействием практически не изменялось. Отмечалось лишь статистически значимое увеличение объема ядер нейронов, что свидетельствовало о повышении их функциональной активности. При ультраструктурном исследовании большинство нейронов имели ядра со слабо выраженной складчатостью кариолеммы, а иногда с выпячиванием наружной мембраны и отделением в цитоплазму цистерн цитоплазматической сети. В перикарионе выявлялось

достаточно большое количество органоидов, особенно рибосом, как свободных, так и связанных с цитоплазматической сетью. Значительное число митохондрий имели плотно упакованные кристы, но иногда встречались митохондрии с просветленным матриксом и разрушенной внутренней мембраной. В отдельных нейронах выявлялись скопления лизосом и фагосом. Наряду с деструктивными изменениями в нейронах наблюдались признаки приспособительно-компенсаторного характера в виде увеличения объема ядер и количества органоидов, особенно белоксинтезирующего профилля.

После 90-разового микроволнового облучения мышей морфология большинства (70.7%) нейронов лобной коры не была изменена. Однако было увеличено количество нервных клеток с повышенной функциональной активностью (гипохромные). Хроматоллиз нейронов имел диффузный характер и сочетался с гетероморфной вакуолизацией перикариона. Набухшие отростки таких нейронов прослеживались на значительном расстоянии. Несмотря на то что количество пикноморфных клеток и клеток-теней при данном воздействии было статистически незначимым, величина нервно-клеточного индекса была снижена как по отношению к контролю, так и предшествующим экспериментальным группам (табл. 2).

Ультраструктура большинства нейронов характеризовалась умеренной электронной плотностью ядра и цитоплазмы. Встречались и осмиофильные нервные клетки, ядра которых имели извитые контуры кариолеммы с конденсированными на ее внутренней поверхности глыбками хроматина. В перикарионе располагались многочисленные рибосомы и полисомы, а также митохондрии с плотным или просветленным



Рис. 5. Лобная кора мыши после 30-разового микроволнового облучения. Фрагмент нейрона коры с набуханием и распадом ультраструктур. Электроннограмма, $\times 31\,000$.

Fig. 5. Mouse frontal cortex after 30-time microwave irradiation. A fragment of a cortical neuron with swelling and disintegration of ultrastructures. Electronogram, $\times 31\,000$.

матриксом. Выявлялись клетки с аутофагическими вакуолями и скоплением лизосом.

Таким образом, с возрастанием экспозиции электромагнитного воздействия у мышей наблюдалась тенденция к снижению функциональной активности ядер нервных клеток, увеличению количества нейронов с альтерацией и обеднению нейронной популяции лобной коры.

Таблица 2. Структурно-функциональное состояние нейронов лобной коры животных после 90-разового электромагнитного облучения, % к контролю

Table 2. Structural and functional state of neurons of the frontal cortex of animals after 90-time electromagnetic irradiation as a percentage of control

Экспериментальные животные	Объем ядер нейронов	Типы нейронов				Нервно-клеточный индекс
		нормохромные	гипохромные	гиперхромные	деструктивные	
мыши	70.5*	86.9*	155.9*	109.4	270.4*	66.9*
крысы	91.6	97.4	100.8	121.6*	140.3*	91.7
собаки	86.9*	95.3	111.2	119.5*	128.6*	92.3

После 30-разового электромагнитного облучения крыс большинство нейронов сохраняли обычную структурную организацию, но достаточно большое их количество имели различные изменения. В цитоплазме таких нейронов выявлялись различные виды хроматолиза и вакуолей, ядра были смещены на периферию, имели неровные контуры и эксцентрично расположенное ядрышко. Реже встречались гиперхромные и пикноморфные нейроны. Нервно-клеточный индекс имел тенденцию к снижению. Кариометрические показатели практически соответствовали контролю. При ультраструктурном исследовании большинство нейронов имели повышенную электронную плотность как цитоплазмы, так и ядра. В перикарионе таких клеток отмечалось увеличение числа рибосом и полисом, как свободных, так и связанных с мембранами цитоплазматической сети. Ядра содержали достаточно большое количество хроматина, уплотненные глыбки которого конденсировались на внутренней поверхности кариолеммы. В ряде случаев митохондрии имели просветленный матрикс и частично разрушенные кристы. Встречались различной степени зрелости лизосомы, а также их очаговые скопления. У некоторых клеток плотность цитоплазматического матрикса была снижена за счет обеднения ультраструктурами. Иногда встречались пикноморфные нейроны, в перикарионе которых наблюдалось набухание митохондрий и цистерн цитоплазматической сети. В целом после 30-разового воздействия микроволнами в нейронах выявлены незначительные морфологические изменения в основном функционального характера.

После 60-разового электромагнитного воздействия в лобной коре крыс выявлялись различные по характеру и степени выраженности изменения нейронов. В цитоплазме ряда нервных клеток наблюдался хроматолиз базофильного вещества и реже — гетероморфные вакуоли. Ядра в гиперхромных нейронах были бледно окрашены, смещены на периферию, а их границы имели неровные контуры. Отростки таких клеток имели извилистый ход и выявлялись на значительном расстоянии. Реже встречались гипохромные нервные клетки, для которых характерно наличие периферического хроматолиза в сочетании с вакуолизацией. Количество нейронов с альтерацией имело тенденцию к увеличению. Выявлено также значимое снижение объема ядер и нервно-клеточного индекса. Это

свидетельствовало о снижении функциональной активности и гибели части нервных клеток.

При электронно-микроскопическом исследовании на фоне обычных нейронов встречались клетки с массовым распадом ультраструктур, пикноморфные клетки, а также формирующиеся очаги периваскулярного отека. Аксональные отделы ряда синапсов были набухшими и содержали небольшое количество везикул в области активной зоны мембран или в центре синаптической претерминали.

После 90-разового облучения на фоне основной массы неизмененных нервных клеток выявлялись нейроны с неравномерным распределением базофильного вещества в перикарионе, а также гиперхромные и пикноморфные нейроны. Объем ядер нейронов и нервно-клеточный индекс по сравнению с 60-разовым облучением увеличивались и практически соответствовали контролю. Электронно-микроскопическое исследование выявило в перикарионе увеличение содержания свободных рибосом и полисом, умеренное расширение цистерн цитоплазматической сети и просветление матрикса у части митохондрий. Наблюдалась достаточно выраженная складчатость ядерной оболочки. Осмиофильное ядрышко часто располагалось у внутренней поверхности кариолеммы и наблюдался выход из него гранул рибонуклеопротеидов. В некоторых нейронах, обедненных ультраструктурами, в цитоплазме наблюдались очаги локальной дегенерации ультраструктур и скопление формирующихся лизосом (рис. 6).

Большинство синапсов сохраняли обычное строение, но достаточно большое их количество имели признаки функционального напряжения. В целом после 90-разового воздействия микроволнами отмечалось уменьшение количества измененных структур нейронов и признаки компенсаторного характера. Ультраструктурные исследования свидетельствовали об увеличении числа рибосом и полисом, просветлении матрикса части митохондрий, умеренном расширении цистерн цитоплазматической сети.

Морфологическая картина большинства нейронов лобной коры собак после 90-разового микроволнового воздействия не имела функционально значимых изменений. На этом фоне встречались нейроны с очагами хроматолиза базофильного вещества, вакуолизацией и набуханием цитоплазмы, а также отростков. Ядра нейронов были смещены на периферию и имели неровные

контуры. Встречались также гиперхромные и пикномофные нервные клетки. Содержание в нейронах общего белка и цитоплазматической РНК соответствовало таковому у контрольных животных. Объем ядер нейронов и нервно-клеточный индекс имели тенденцию к снижению.

Электронно-микроскопические исследования показали, что структурная организация клеточных элементов и нейропиля лобной коры собак не имела значимых морфологических изменений. Вместе с тем типичной реакцией нейронов на длительное микроволновое облучение являлось увеличение количества осмиофильных нейронов, которые при светооптическом исследовании выглядели гиперхромными за счет повышенного содержания рибонуклеопротеидов. В цитоплазме таких нейронов постоянно наблюдалась мелкоячеистая вакуолизация, а отходящие отростки имели повышенную электронную плотность и прослеживались на значительном расстоянии. В осмиофильных нейронах наблюдалось расширение перинуклеарного пространства, элементов цитоплазматической сети, набухание митохондрий и гетероморфная мелкоячеистая вакуолизация. Заметно было увеличено количество глиальных клеток, контактирующих с нейронами, причем в зоне контакта каких-либо морфологических изменений не выявлялось. Следует отметить и лизосомальную реакцию, которая выявлялась как в нервных клетках, так и в нейропили.

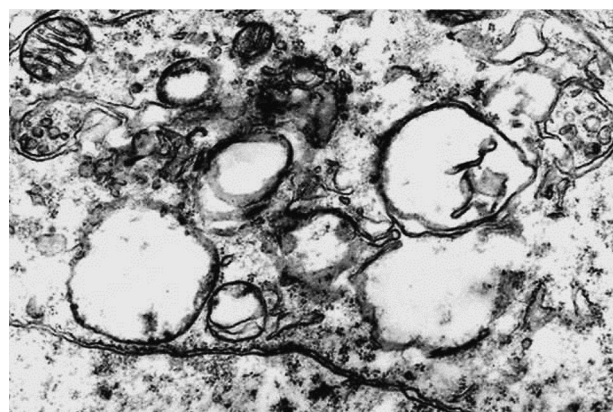


Рис. 6. Лобная кора крысы после 90-разового микроволнового облучения. Набухание и распад ультраструктур и формирование лизосом в светлом нейроне. Электронограмма, $\times 24\,000$.

Fig. 6. The frontal cortex of a rat after 90-time microwave irradiation. Swelling and disintegration of ultrastructures and the formation of lysosomes in a light neuron. Electronogram, $\times 24\,000$.

В отдельных нейронах наблюдалось увеличение количества лизосом, которые, сливаясь с разрушенными митохондриями, образовывали аутофагосомы. В нейропили лизосомы обычно локализовались в периваскулярной зоне (рис. 7).

У специализированных элементов нейронов (нейротрубочки, нейрофиламенты, синапсы)

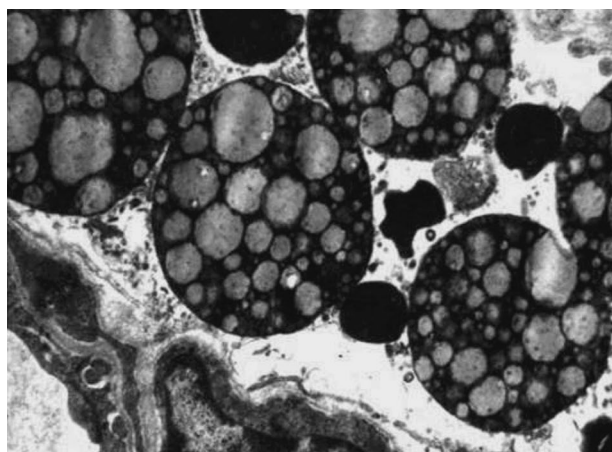


Рис. 7. Лобная кора собак после 90-разового микроволнового воздействия. Дегенерация стенки капилляра, скопление лизосом и фагосом в периваскулярной зоне. Электронограмма $\times 17\,000$.

Fig. 7. Frontal cortex of dogs after 90-time microwave exposure. Degeneration of the capillary wall, accumulation of lysosomes and phagosomes in the perivascular zone. Electronogram $\times 17\,000$.



Рис. 8. Лобная кора собаки после 90-разового микроволнового воздействия. Поперечный срез нервного волокна. Отек и расслоение миелиновой оболочки. Электронограмма, $\times 27\,000$.

Fig. 8. Frontal cortex of dogs after 90-time microwave exposure. A cross section of a nerve fiber. Swelling and dissection of the myelin sheath. Electronogram, $\times 27\,000$.

функционально значимые изменения практически не выявлялись. Однако у некоторых отростков нервных клеток отмечалось набухание и дезорганизация миелиновой оболочки (рис. 8).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования подтвердили более ранние данные о высокой морфофункциональной реактивности, а также компенсаторных возможностях у нейронов коры больших полушарий головного мозга при воздействии различных режимов электромагнитного излучения [9, 33–37]. При остром облучении выраженность изменений возрастала с увеличением интенсивности электромагнитного воздействия и площади облучаемой поверхности тела. Наибольшую чувствительность к рассматриваемому фактору демонстрировали структуры нейронов, связанные с экспрессией белка (ядра, ядрышки и цитоплазматическая сеть). Значительное место в патоморфологической картине занимало также изменение структур межнейрональной интеграции, что подтверждает данные ряда исследователей о патологических изменениях синапсов при микроволновом воздействии [9, 30–32, 38]. Одним из критериев функционального состояния нейронов при электромагнитном облучении, поддающихся математическому анализу, являлся объем ядер нервных клеток. Установлено, что при парциальном облучении головы ядра нейронов набухали, а с увеличением времени воздействия становились однородными по объему. При общем равномерном облучении объем ядер значимо снижался. При увеличении энергетической экспозиции ядра нервных клеток утрачивали способность реагировать на воздействующий фактор изменением своего объема.

Гистохимические исследования показали, что изученные ферментные системы нервных клеток не играют значимой роли в их реакции на микроволновое излучение. При больших энергетических экспозициях наблюдался распад мембранных структур нервных клеток, денатурация белка, расстройство микроциркуляции и отек мозга, которые нарастали с увеличением облучаемой массы тела и при общем облучении приводили к гибели животных практически “под лучом”.

При хроническом микроволновом воздействии в лобной коре мышей, крыс и собак, наряду с неспецифическими функциональными и альтеративными изменениями, абсолютное

большинство нервных клеток сохраняли свою структурно-функциональную организацию. Встречающиеся изменения были, как правило, обратимыми, имели волнообразный характер и были более выражены у мышей после 30- и 90-, а у крыс — после 60-разового воздействия. Отклик нейронов на микроволновое воздействие имел видовые особенности и находился в обратной зависимости от массы тела животного. Наиболее чувствительными оказались нейроны лобной коры мышей, более резистентными они были у крыс и наименьшей чувствительностью к рассматриваемому фактору отличались нейроны собак. При этом функциональная активность ядер нейронов во всех случаях была снижена.

В ряде случаев, независимо от режима воздействия микроволн, нейроморфологические изменения имели пограничный характер, когда они уже не являлись нормой и в тоже время еще и не являлись патологией. Хотя уровень значимости таких изменений колебался по отношению к контролю в функционально незначимых пределах, их наличие свидетельствовало о нестабильности структурно-функциональной организации нервных клеток и напряженности их функционирования. С течением времени изменения нервных клеток репарировались, но какая-то их часть оставалась нерепарируемой и, накапливаясь, приводила к отдельным экстремумам в восстановительном периоде. Такие волнообразные изменения показателей состояния нейронов, особенно на фоне других вредных и опасных факторов среды, могут служить материальным субстратом для развития более выраженных нарушений деятельности нервной системы.

В свете последних данных о способности микроволнового излучения вызывать в головном мозге различные новообразования [5, 7, 19, 24, 26] привлекает внимание рост новых тончайших нервных волокон из наплывов нейроплазмы по ходу осевых цилиндров отростков нейронов при хроническом электромагнитном облучении. Раньше это явление, особенно в периферических нервных образованиях, отмечали и другие исследователи [9, 29, 31].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показали высокую чувствительность, а также хорошие компенсаторные возможности нейронов коры головного мозга как при остром, так и хроническом электромагнитном облучении. В восстановительном

периоде большинство морфологических изменений репарировались, а оставшиеся свидетельствовали о функциональном напряжении нейронов, синапсов и микроциркуляторного русла. При высоких энергетических экспозициях изменения становились более выраженными и нарастали с увеличением площади облучаемой поверхности. А при общем облучении (ППЭ 300 мВт/см², экспозиция 4 и 6 мин) наблюдалась гибель животных практически “под лучом”. Гистопатологические исследования выявили распад мембранных структур и денатурацию белковых молекул нервных клеток, синапсов, выраженное нарушение кровообращения с нарастающим отеком мозга и неблагоприятным прогнозом для жизни. При пролонгированном микроволновом воздействии у мышей, крыс и собак, наряду с неспецифическими функциональными и деструктивными изменениями, большинство нейронов не изменялись. Встречающиеся изменения были, как правило, обратимыми, имели волнообразный характер и были более выражены у мышей после 30- и 90-, а у крыс — после 60-разового воздействия. У собак длительное микроволновое облучение не вызывало значимых изменений в структурно-функциональной организации лобной коры.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена без целевого финансирования

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ушаков Игорь Борисович, ORCID 0000-0002-0270-8622, доктор медицинских наук, профессор, академик РАН и РАМН, главный научный сотрудник ГНЦ РФ — Федерального медицинского биофизического центра им. А.И. Бурназяна ФМБА России.

123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46.

Электронная почта: Fmbc@fmbamail.ru

Ushakov Igor Borisovich, ORCID 0000-0002-0270-8622, Doctor of Medical Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Sciences and the Russian Academy of Medical Sciences, Chief Researcher of the Scientific Research Center of the Russian Federation — A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia.

46 Zhivopisnaya Street, Moscow, 123098.

E-mail: Fmbc@fmbamail.ru

Федоров Владимир Петрович, ORCID iD 0000-0001-6136-5861, доктор медицинских наук, профессор Воронежской государственной академии спорта.

394000, г. Воронеж, ул. Карла Маркса 59.

Электронная почта: vgifk@vmail.ru.

Fedorov Vladimir Petrovich, ORCID iD 0000-0001-6136-5861, Doctor of Medical Sciences, Professor Voronezh State Academy of Sports.

59 Karl Marx Street, Voronezh, 394000.

E-mail: vgifk@vmail.ru .

Давыдов Борис Ильич, доктор медицинских наук, профессор Государственный научный исследовательский испытательный институт авиационной и космической медицины.

Умер

Davydov Boris Ilyich, Doctor of Medical Sciences, Professor State Scientific Research and Testing Institute of Aviation and Space Medicine.

Died.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеева В.А., Григорьев О.А., Прокофьева А.С., Гошин М.Е. История научных конференций по электромагнитной биологии, радиобиологии и гигиене неионизирующих излучений в России. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Доклады Всероссийской научной конференции. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 178–182. [Grigoriev O.A., Prokofiev A.S., Goshin M.E. Istoriya nauchnyh konferencij po elektromagnitnoj biologii, radiobiologii i gigiene neioniziruyushchih izluchenij v Rossii = History of scientific conferences on electromagnetic biology, radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in Russia. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 178–182. (In Russ.)]
2. Антипов В.В., Давыдов Б.И., Тихончук В.С. Биологическое действие электромагнитных излучений микроволнового диапазона. М.: Наука, 1980.

- 221 с. [Antipov V.V., Davydov B.I., Tikhonchuk V.S. Biologicheskoe dejstvie elektromagnitnyh izluchenij mikrovolnovogo diapazona = Biological effect of electromagnetic radiation in the microwave range. M.: Nauka, 1980. V. 40. 221 p. (In Russ.)]
3. Воронцова З.А., Ушаков И.Б., Хадарцев А.А., Есауленко И.Э., Гонтарев С.Н. Морфофункциональные соотношения при воздействии импульсных электромагнитных полей. Тула: ТулГУ, 2012. 368 с. [Vorontsova Z.A., Ushakov I.B., Khadartsev A.A., Esaulenko I.E., Gontarev S.N. Morfofunkcional'nye sootnosheniya pri vozdeystvii impul'snyh elektromagnitnyh polej = Morphofunctional relations under the influence of pulsed electromagnetic fields. Tula: TulSU, 2012. 368 p. (In Russ.)]
 4. Григорьев О.А., Меркулов А.В., Григорьев К.А. Электромагнитные поля базовых станций подвижной радиосвязи и экология. Характеристика и оценка электромагнитной обстановки вокруг базовых станций подвижной радиосвязи. *Радиационная биология. Радиоэкология*. 2005;45(6):722–725. [Grigoriev O.A., Merkulov A.V., Grigoriev K.A. Electromagnetic fields of mobile radio base stations and ecology. Characterization and evaluation of the electromagnetic environment around mobile radio base stations. *Radiation biology. Radioecology*. 2005; 45(6):722–725. (In Russ.)]
 5. Григорьев Ю.Г. Человек в электромагнитном поле (существующая ситуация, ожидаемые биоэффекты и оценка опасности). *Радиационная биология. Радиоэкология*. 1997;37(4):690–702. [Grigoriev Yu.G. A man in an electromagnetic field (the current situation, expected bioeffects and hazard assessment). *Radiation Biology. Radioecology*. 1997;37(4):690–702. (In Russ.)]
 6. Григорьев О.А. Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений в связи с развитием новых технологий. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф., Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 104–109. [Grigoriev O.A. Aktual'nye voprosy radiobiologii i gigieny neoiniziruyushchih izluchenij v svyazi s razvitiem novyh tekhnologij = Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation in connection with the development of new technologies. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 104–109. (In Russ.)]
 7. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2016. 574 с. [Grigoriev Yu.G., Grigoriev O.A. Sotovaya svyaz' i zdorov'e: elektromagnitnaya obstanovka, radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy, prognoz opasnosti = Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard forecast. Moscow: Ekonomika, 2016. 574 p. (In Russ.)]
 8. Григорьев Ю.Г. Значимость адекватной информации об опасности ЭМП сотовой связи для здоровья населения в 21 веке. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 22–25. [Grigoriev Yu.G. Znachimost' adekvatnoj informacii ob opasnosti EMP sotovoj svyazi dlya zdorov'ya naseleniya v 21 veke = The importance of adequate information about the dangers of cellular EMF for public health in the 21st century. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M: RNKZNI, 2019. P. 22–25. (In Russ.)]
 9. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Зуев В.Г. Нейроморфологические эффекты электромагнитных излучений. Воронеж: Центрально-Черноземное книжное изд-во, 2007. 287 с. [Ushakov I.B., Fedorov V.P., Zuev V.G. Nejromorfologicheskie efekty elektromagnitnyh izluchenij = Neuromorphological effects of electromagnetic radiation. Voronezh: Central Chernozem Book Publishing House, 2007. 287 p. (In Russ.)]
 10. Городничев Р.М., Петров Д.А., Фомин Р.Н. Магнитная стимуляция головного мозга как новый метод диагностики функционального состояния двигательной системы спортсменов. *Теория и практика физической культуры*. 2006;(1):2–5. [Gorodnichev R.M., Petrov D.A., Fomin R.N. Magnitnaya stimulyaciya golovnogogo mozga kak novyj metod diagnostiki funkcional'nogo sostoyaniya dvigatel'noj sistemy sportsmenov = Magnetic stimulation of the brain as a new method of diagnosing the functional state of the motor system of athletes. *Theory and Practice of Physical Culture*. 2006;(1):2–5. (In Russ.)]
 11. Городничев Р.М. Стимуляционные воздействия на ЦНС как средство изменения координационной структуры локомоторных движений. В кн.: Ценности, традиции и новации современного спорта: Мат. V Всерос. конф. М.: Малаховка, 2017. С. 23–29. [Gorodnichev R.M. Stimulyacionnye vozdeystviya na CNS kak sredstvo izmeneniya koordinacionnoj struktury lokomotornyh dvizhenij = Stimulating effects on the central nervous system as a means of changing the coordination structure of locomotor movements. In: Values, traditions and innovations of modern sports: materials of the V All-Russian Conference. M.: Malakhovka, 2017. P. 23–29. (In Russ.)]
 12. Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М.: Наука, 1975. 284 с. [Kholodov Yu.A. Reakcii nervnoj sistemy na elektromagnitnye polya = Reactions of the nervous system to electromagnetic fields. M.: Nauka, 1975. 284 p. (In Russ.)]

13. Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. М: Энергоатомиздат, 1984. 176 с. [Davydov B.I., Tikhonchuk V.S., Antipov V.V. Biologicheskoe dejstvie, normirovanie i zashchita ot elektromagnitnyh izluchenij=Biological action, rationing and protection from electromagnetic radiation. M.: Energoatomizdat, 1984. 176 p. (In Russ.)]
14. Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В., Павлова Л.Н. Влияние модулированного ЭМП низкой интенсивности на общую возбудимость ЦНС. *Радиация и риск*. 2011;20(2):64–74. [Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V., Pavlova L.N. Vliyanie modulirovannogo EMP nizkoj intensivnosti na obshchuyu vozбудimost' CNS=The effect of modulated low-intensity EMF on the general excitability of the central nervous system. *Radiation and Risk*. 2011; 20(2): 64–74. (In Russ.)]
15. Лукьянова С.Н. Фундаментальная характеристика реакции нейронов головного мозга на ЭМП нетепловой интенсивности. *Радиация, биология. Радиоэкология*. 2019;59(4):414–429. [Lukyanova S.N. Fundamental'naya harakteristika reakcii nejronov golovnogogo mozga na EMP neteplovoj intensivnosti=Fundamental characteristic of the reaction of brain neurons to EMF of non-thermal intensity. *Radiation Biology. Radioecology*. 2019;59(4):414–429. (In Russ.)]
16. Чиженкова Р.А. Перестройки в деятельности нейронных популяций коры при СВЧ. *Неврол. вестник им. В.М. Бехтерева*. 2007;39(4): 43–47. [Chizhenkova R.A. Perestrojki v deyatel'nosti nejronnyh populyacij kory pri SVCh =Perestroika in the activity of neural populations of the cortex in microwave. *Neurological Bulletin named after V.M. Bekhterev*. 2007; 39(4):43–47. (In Russ.)]
17. Calabro E. Effects of Electromagnetic Fields on Cells and Proteins' Structure. Lambert Academic Publishing, 2012. 300 p.
18. 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;22(3):277–289.
19. Григорьев О.А., Зубарев Ю. Б. Действие электромагнитной энергии беспроводной связи на человека: прогнозы роста обусловленной заболеваемости, их реализация и проблемы оценки. *Концепции*. 2022;41(1):3–17. [Grigoriev O.A., Zubarev Yu.B. Dejstvie elektromagnitnoj energii besprovodnoj svyazi na cheloveka: prognozy rosta obuslovlennoj zabolevaemosti, ih realizaciya i problemy ocenki=The effect of electromagnetic energy of wireless communication on a person: forecasts of the growth of conditioned morbidity, their implementation and evaluation problems. *Conceptions*. 2022;41(1):3–17. (In Russ.)]
20. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018. 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Kolichestvennye kriterii mikrovolnovogo porazheniya=Quantitative criteria of microwave damage. M.: GEOS, 2018. 232 p. (In Russ.)]
21. Лукьянова С.Н. Нейроэффекты слабых электромагнитных воздействий (от нейрона к образованиям мозга, ЦНС, организму. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 26–28. [Lukyanova S.N. Nejroeffekty slabyh elektromagnitnyh vozdeystvij (ot nejrona k obrazovaniyam mozga, CNS, organizmu=Neuroeffects of weak electromagnetic influences (from neuron to brain formations, central nervous system, body. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: Reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 26–28. (In Russ.)]
22. Bernal-Mondragon C., Arriaga-Avila V., Martinez-Abundis E. et al. Effects of repeated 9 and 30-day exposure to extremely low-frequency electromagnetic fields on social recognition behavior and estrogen receptors expression in olfactory bulb of Wistar female rats. *Neurol. Res*. 2017;39(2):165–175.
23. Hinrikus H., Bachmann M., Karai D., Lass J. Mechanism of low-level microwave radiation effect on nervous system. *Electromagn. Biol. Med*. 2017; 36(2):202–212.
24. Barthelemy A., Mouchard A., Bouji M. et al. Glial markers and emotional memory in rats following acute cerebral EMF exposures. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int*. 2016;23(24):25343–25355.
25. Hardell L., Carlberg M. Lost opportunities for cancer prevention: historical evidence on early warnings with emphasis on radiofrequency radiation. *Rev. Environ. Health*. 2021; <https://doi.org/10.1515/reveh-2020-0168>. published online February 15, 2021.
26. Carlberg M. and Hardell L. Review Article Evaluation of Mobile Phone and Cordless Phone Use and Glioma Risk Using the Bradford Hill Viewpoints from 1965 on Association or Causation. *Hindawi BioMed Res. Int. Vol*. 2017. Article ID 9218486, 17 pages.
27. Баркин В.В., Буянов Л.С., Лопаткина Н.В. Влияние на моторную функцию крыс низкоинтенсивного импульсно-моделированного электромагнитного излучения при различных схемах воздействия. В кн.: Человек и электромагнитные поля: Сб. докл. V Междунар. конф. Саров: ФГУП “РФЯЦ-ВНИИЭФ”, 2017. С. 75–84. [Barkin V.V., Buyanov L.S., Lopatkina N.V. Vliyanie na motornuyu funkciyu krys nizkointensivnogo impul'sno-modelirovannogo elektromagnitnogo izlucheniya pri razlichnyh skemah vozdeystviya=Influence of low-intensity pulse-modulated electromagnetic radiation on the motor function of rats under various exposure schemes. In: Man and electromagnetic fields: Collection of reports of the V International

- Conference. Sarov: FSUE "RFNC-VNIIEF", 2017. P. 75–84. (In Russ.)]
28. Зуев В.Г., Ушаков И.Б. Экспериментальное изучение эффектов острого неравномерного микроволнового облучения. *Мед. радиология*. 1984;29(12): 46–49. [Zuev V.G., Ushakov I.B. Eksperimental'noe izuchenie effektivov ostrogo neravnomernogo mikrovolnovogo oblucheniya=Experimental study of the effects of acute uneven microwave irradiation. *Medical Radiology*. 1984;29(12):46–49. (In Russ.)]
 29. Лукьянова С.Н. ЭМП СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для ЦНС. М.: ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. EMP SVCh diapazona neteplovoj intensivnosti kak razdrazhitel' dlya CNS =EMF of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the Central Nervous System M.: A. I. Burnazyan Federal State Budgetary Research Center, 2015. 200 p. (In Russ.)]
 30. Пахунова Л.В. Влияние СВЧ-поля на некоторые отделы центральной и периферической нервной системы экспериментальных животных: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. М., 1987. [Pakhunova L.V. Vliyanie SVCh-polya na nekotorye otdely central'noj i perifericheskoy nervnoj sistemy eksperimental'nyh zhivotnyh =The effect of the microwave field on some parts of the central and peripheral nervous system of experimental animals: Avtoref. dis cand. biol. nauk = Abstract of the dissertation ... cand. Biol. Sci. M., 1987. (In Russ.)]
 31. Трухачев А.Н., Зуев В.Г., Федоров В.П. Морфофункциональное состояние коры головного мозга в условиях неравномерного электромагнитного излучения. В кн.: Актуальные вопросы функциональной межполушарной асимметрии и нейропластичности: Мат. Всерос. науч. конф. М.: Научный мир, 2008. С. 537–542. [Trukhachev A.N., Zuev V.G., Fedorov V.P. Morfofunkcional'noe sostoyanie kory golovnogo mozga v usloviyah neravnomernogo elektromagnitnogo izlucheniya=Morphofunctional state of the cerebral cortex in conditions of uneven electromagnetic radiation. In: Topical issues of functional hemispheric asymmetry and neuroplasticity: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference. Moscow: Scientific World, 2008. P. 537–542. (In Russ.)]
 32. Ушаков И.Б., Федоров В.П. Церебральные эффекты хронических электромагнитных излучений. В кн.: Человек и электромагнитные поля: Сб. докл. V Междунар. конф. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2017. С. 37–47. [Ushakov I.B., Fedorov V.P. Cerebral'nye efekty hronicheskikh elektromagnitnyh izlucheniij=Cerebral effects of chronic electromagnetic radiation. In: Man and electromagnetic fields: Collection of reports of the V International Conference. Sarov: FSUE "RFNC-VNIIEF", 2017. P. 37–47. (In Russ.)]
 33. Федоров В.П., Ушаков И.Б., Гундарова О.П. Изменения нейронов коры головного мозга при остром неравномерном электромагнитном облучении. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Сб. докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 91–94. [Fedorov V.P., Ushakov I.B., Gundarova O.P. Izmeneniya nejronov kory golovnogo mozga pri ostrom neravnomernom elektromagnitnom obluchenii=Changes in neurons of the cerebral cortex during acute uneven electromagnetic irradiation. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 91–94. (In Russ.)]
 34. Ушаков И.Б., Федоров В.П., Астахова А.Н. Экспериментальная оценка состояния нервной системы при хроническом воздействии неионизирующего излучения. В кн.: Актуальные вопросы радиобиологии и гигиены неионизирующих излучений: Сб. докл. Всерос. науч. конф. Москва, 2019. М.: РНКЗНИ, 2019. С. 29–31. [Ushakov I.B., Fedorov V.P., Astashova A.N. Eksperimental'naya ocenka sostoyaniya nervnoj sistemy pri hronicheskom vozdeystvii neioniziruyushchego izlucheniya=Experimental assessment of the state of the nervous system under chronic exposure to non-ionizing radiation. In: Topical issues of radiobiology and hygiene of non-ionizing radiation: collection of reports of the All-Russian Scientific Conference. Moscow, 2019. M.: RNKZNI, 2019. P. 29–31. (In Russ.)]
 35. Федоров В.П. Влияние электромагнитных излучений на двигательные центры головного мозга. В кн.: Физическая культура, спорт и здоровье в современном обществе: сборник статей Всероссийской конференции. Воронеж: Научная книга, 2018. С. 345–353. [Fedorov V.P. Vliyanie elektromagnitnyh izlucheniij na dvigatel'nye centry golovnogo mozga=The influence of electromagnetic radiation on the motor centers of the brain. In: Physical culture, sport and health in modern society: collection of articles of the All-Russian Conference. Voronezh: Scientific Book, 2018. P. 345–353. (In Russ.)]
 36. Федоров В.П., Гундарова О.П. Экспериментальная оценка стимуляции физической работоспособности электромагнитным излучением. В кн.: Современное состояние и тенденции развития физической культуры и спорта: Сб. науч. статей по итогам VI Всерос. науч.-практ. конф. Белгород, 2019. Белгород: НИУ "БелГУ", 2019. С. 519–525. [Fedorov V.P., Gundarova O.P. Eksperimental'naya ocenka stimulirovaniya fizicheskoy rabotosposobnosti elektromagnitnym izlucheniem=Experimental evaluation of stimulation of physical performance by electromagnetic radiation. In: The current state and trends in the development of physical culture and sports: A collection of scientific articles on the results of the VI All-Russian Scientific and Practical Conference. Belgorod, 2019. Belgorod: NRU "BelSU", 2019. P. 519–525. (In Russ.)]

37. Eghlidospour M., Ghanbari A., 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; 50(2): 115–123.
38. Kim J.H., Kim H.J., Yu D.H., Kweon H.S., Huh Y.H. Changes in numbers and size of synaptic vesicles of cortical neurons induced by exposure to 835 MHz radiofrequency-electromagnetic field. *Anat. Cell Biol.* 2017;50(8): 246.

Neuromorphological Effects of Acute and Chronic Electromagnetic Irradiation

I.B. Ushakov¹, V.P. Fedorov^{2,*}, B.I. Davydov³

¹State Scientific Center – A.I. Burnazyan Federal Medical Biophysical Center of the FMBA of Russia, Moscow

²Voronezh State Academy of Sports, Voronezh, Russia

³State Scientific Research Testing Institute of Aviation and Space Medicine, Moscow, Russia

*E-mail: fedor.vp@mail.ru

Morphological changes in the cerebral cortex were studied in model experiments on three types of laboratory animals (mice, rats, dogs) exposed to both acute and chronic electromagnetic radiation. It has been established that neurons are highly reactive and at the same time plasticity to the electromagnetic factor. Changes in neurons are more pronounced with general than with partial irradiation. The greatest response was found from the structures of the protein-synthesizing system of neurons, as well as their interneuronal contacts. After 3 days of the recovery period, changes were detected only at the ultrastructural level in the form of residues, decayed organelles, clusters of lysosomes and local foci of brain edema. With chronic exposure to microwaves with exposure at the “zero effect” level, the sensitivity of neurons to electromagnetic radiation was characterized by species differences and was inversely dependent on the animal’s body weight: mice were the most sensitive, the structures of the rat nervous system were more resistant, and the nervous structures of dogs had the least sensitivity.

Keywords: electromagnetic radiation, brain, neurons, synapses, blood-brain barrier, changes in various modes of electromagnetic exposure