

НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 591.18:537.8:599.323.4:57.084.1

ВЛИЯНИЕ МНОГОКРАТНОГО И ХРОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА ЧАСТОТ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА ПОВЕДЕНИЕ И КОГНИТИВНЫЕ ФУНКЦИИ МОЗГА КРЫС

© 2019 г. Л. Н. Павлова^{1,*}, О. И. Колганова¹, О. С. Измestьева¹,
В. В. Панфилова¹, Л. П. Жаворонков¹

¹ Медицинский радиологический научный центр им. А. Ф. Цыба – филиал Национального медицинского исследовательского центра радиологии Минздрава России, Обнинск, Россия

*E-mail: pavlova.ln@inbox.ru

Поступила в редакцию 22.03.2019 г.

В трех сериях опытов на крысах Вистар изучалось влияние 3-кратного (через 4–5 дней), 4-кратного (1 раз в неделю) и хронического (40 сеансов по 2 ч в день) воздействия широкополосного низкоинтенсивного импульсно-модулированного ЭМП на выработку, консолидацию и воспроизведение условного оборонительного рефлекса избегания (УРИ). Параметры воздействия ЭМИ во всех случаях выбирались в соответствии с реальным функционированием мобильной связи в условиях временной перегрузки (“загрязнения”) биосферы ЭМ-полями. Облучение осуществлялось в безэховой камере с использованием разного числа несущих (3, 9 или 10) от блока генераторов с частотами от 1 до 4 ГГц, при суммарной ППЭ в импульсе 300 мкВт/см², длительности импульса 25 или 50 мс и модулирующей свиппированной импульсацией в диапазоне частот ЭЭГ (от 1 до 6 Гц). Выявлены аномальные явления в виде нарушения когнитивных функций, нестабильности поведения в процессе обучения, отклонений со стороны краткосрочной и долгосрочной памяти. Воздействие ЭМИ на ЦНС может носить разнонаправленный характер, что в конечном итоге негативно сказывается на процессе обучения. Эти явления транзиторны и не достигают уровня высокой клинической значимости. Показано, что предварительное многоразовое тестирование (“обучение”) сглаживает негативный эффект хронического воздействия ЭМИ и ускоряет процессы адаптации.

Ключевые слова: крысы Вистар, хроническое облучение, низкоинтенсивное неионизирующее излучение, диапазон частот мобильной связи, шаттл-бокс, поведение, условный оборонительный рефлекс, обучение

DOI: 10.1134/S0869803119060080

Накопленный и представленный в отечественной и зарубежной литературе материал [1–6], а также наш собственный опыт изучения биоэффектов СВЧ облучения [7–11] позволяют считать установленным фактом то, что воздействие на организм низкоинтенсивного электромагнитного поля (ЭМП), не приводящее к изменению теплового баланса биообъекта, при определенных условиях может вызвать реакции различных функциональных систем. Хорошо известно, что ведущей функциональной системой организма высших животных и человека, реагирующей на разнообразные воздействия, является ЦНС, а в работах С.Н. Лукьяновой [12] достоверно показано, что электромагнитное поле СВЧ-диапазона нетепловой интенсивности является раздражителем для центральной нервной системы и может оказывать синхронизирующее действие на биоэлектрические процессы в мозге. Особое место в последние годы придается проблеме оценки влияния на организм ЭМИ мобильной сотовой свя-

зи, действующей в диапазоне радиочастот (950–2700 МГц). Все чаще встречаются работы в отечественной и зарубежной литературе об отклонениях со стороны ЦНС при использовании мобильных телефонов. Так, анализ результатов проведенных широкомасштабных эпидемиологических исследований привел авторов к заключению о связи частых жалоб взрослого населения (пользователей сотовыми телефонами) на головную боль, снижение концентрации внимания, утомляемость, плохое самочувствие с использованием мобильных телефонов [13–16]. Зарегистрировано некоторое снижение показателей работоспособности, внимания и памяти у детей – пользователей мобильных телефонов, хотя показатели снижались лишь до нижних границ возрастной нормы [17]. У студентов-добровольцев – пользователей мобильных телефонов изменялось содержание в слюне гормонов (кортикостероидов и гистамина), участвующих в формировании внимания как важного элемента адаптации [18]. В опытах на

крысах при облучении ЭМИ в диапазоне интенсивностей, используемых в быту и мобильной связи, при определенных модулирующих частотах наблюдали снижение уровня тревожности [19]. Нами показано угнетение когнитивных функций у крыс Вистар, вызванное однократным 30-минутным воздействием низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного ЭМП [10], а в опытах по изучению особенностей поведения крыс в экстремальных условиях при тех же параметрах воздействия обнаружено анксиолитическое действие ЭМИ, проявляющееся снижением фобии к аверсивному раздражению [20]. Выявленные эффекты кратковременного однократного воздействия как при моно-, так и при поличастотном источнике низкоинтенсивного излучения, транзиторны и обнаруживаются лишь на пороге разрешающей способности используемых параметрических и непараметрических методов анализа.

В реальности население подвергается комплексному воздействию набора источников с разными несущими частотами, что дало Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ) основание ввести термин “электромагнитное загрязнение окружающей среды”. В связи с этим ставится задача изучения хронического воздействия ЭМИ СВЧ диапазона средств мобильной связи на фоне многочастотного электромагнитного “шума” постоянно работающих бытовых и производственных установок. Особенно важны эти исследования для лиц, профессионально связанных с работой или проживанием в этих условиях.

В связи с изложенным, задачей настоящего исследования являлось изучение влияния сложноорганизованного ЭМП диапазона частот сотовой связи, близкого по параметрам к натурным условиям, при многократном и хроническом воздействии.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Опыты проведены на самцах крыс Вистар массой 200–250 г. Животных содержали в стандартных пластиковых клетках в условиях климатического комфорта ($t \sim 22^\circ\text{C}$, влажность воздуха 50%) на стандартном пищевом рационе, состоящем из распаренного зерна и брикетированного корма. Все работы с животными выполняли в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов о порядке экспериментальной работы и гуманном отношении к животным [21].

Поставлено три серии опытов по изучению хронического воздействия ЭМИ при разных вариантах многократности сеансов облучения (3, 4 и 40) и числа несущих в диапазоне частот мобильной связи (3, 9 и 10 соответственно). Облучение проводили в безэховой камере в условиях комфортной температуры и влажности ($22.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ и

$55 \pm 5\%$ соответственно) и конвекционном потоке воздуха – 0.5 м/с. Для создания экспериментального ЭМП использовали два блока генераторов по 10 несущих частот в каждом в диапазоне 1–4 ГГц при суммарной ППЭ в импульсе 300 мкВт/см^2 , длительности импульса 25 или 50 мс и модулирующей свипированной импульсацией в диапазоне частот ЭЭГ от 1 до 6 Гц, при этом средние значения ППЭ не превышали 40 мкВт/см^2 . Во время облучения животные находились в решетчатых контейнерах из оргстекла, обеспечивающих воздухообмен и ограничивающих свободное передвижение. Контейнеры устанавливали на площадке в зоне сформированной волны (2.1–3.0 м от рупора), при этом продольная ось тела животного была ориентирована параллельно направлению вектора E поля.

Во всех случаях проведенных экспериментов животные подвергались воздействию низкоинтенсивного широкополосного (диапазона несущих частот от 1 до 4 ГГц) ЭМП, модулированного импульсами частот ЭЭГ. Параметры ЭМП и частота модуляции определены, исходя, прежде всего, из теоретических предположений возможности влияния ЭМИ на ЦНС [22], а также на основании результатов предварительных собственных исследований [8, 9]. Психофизиологический статус после хронического воздействия ЭМИ оценивали по результатам исследований поведения и когнитивных функций мозга по способности животных к выработке и воспроизведению условного оборонительного рефлекса на электрокожное болевое раздражение. Условно-рефлекторная реакция, являясь весьма сложноорганизованным поведенческим актом, отражает, по существу, комплекс взаимосвязанных процессов высшей нервной деятельности. В ее основе лежат такие физиологические понятия, как доминанта и мотивация, формирование ассоциативных связей, кодирование и накопление информации в краткосрочной и долгосрочной памяти, а также способность ее извлечения в виде воспроизведения навыка. Не менее важной характеристикой поведения в данном тесте является проявление эмоциональности в условиях психогенного стресса. Поликритериальная оценка поведения животных по этой методике позволяет судить даже о незначительных отклонениях функционального состояния высших отделов ЦНС и, в частности, когнитивных функций мозга.

Метод выработки условного оборонительного рефлекса избегания неоднократно описан нами ранее [10]. Суть метода сводится к тому, что животное на условный раздражитель (свет + звуковой сигнал) должно перебежать в другой (безопасный) отсек двухкамерного устройства (“Shuttle-box”) до подачи на электродный пол безусловного болевого сигнала в виде слабого электрического тока силой в 1 мА. Сессия обуче-

ний состояла из 40–50 таких циклов сочетания условного и безусловного раздражителей при следующей программе подачи сигналов: свет + звук – 4 с; болевой раздражитель – с 4 по 12 с; пауза между циклами – 20 с.

В наших экспериментах использовали комплекс из трех челночных камер, объединенных устройством, задающим программу обучения в автоматическом режиме и регистрирующем латентное время реакции с точностью до 0.1 с одновременно у трех крыс. Анализ процесса обучения в условно-рефлекторном тесте осуществлялся по наиболее информативным показателям оценки конечной результативности и ряду скоростных показателей процесса обучения, многие из которых сформировались в ходе исследований и предложены нами впервые. Считаем необходимым вкратце перечислить используемые тесты и пояснить значение некоторых из них.

Интегративные показатели результативности обучения: 1) число пропущенных ударов до регистрации первого УРИ – лаг-фаза обучения; 2) общее число УРИ за сессию, из них быстрых (латентный период до 2.5 с) и медленных (латентный период более 2.5 с); 3) число перебежек в другой отсек после удара током; 4) число отказов (отсутствие побегов на электрокожное подкрепление); 5) число попыток до серии из трех и более УРИ подряд (критерий оценки состояния консолидации памятного следа); 6) число крыс, имеющих серии УРИ; 7) число серий УРИ за сеанс.

Скоростные показатели выработки рефлекса:

1) регрессия отношения числа УРИ к общему числу попыток (доля УРИ, %). Расчетный параметр ОБ-50 (интегральный показатель 50%-ной обученности);

2) регрессия отношения успехов (УРИ) к неудачам. Дает возможность сравнить подопытные группы с контролем по коэффициентам регрессии (исходному уровню обученности и скорости обучения), а также вычислить два показателя, важных для оценки изучаемого процесса: а) степень консолидации навыка (СКН) – отношение уровня обученности (успех/неуспех за 10 попыток) в начале повторного теста к аналогичному показателю в конце предыдущего тестирования; б) относительную скорость обучения – отношения В – коэффициентов регрессии функции успех/неуспех у подопытных и контрольных животных в каждый срок испытания.

Все количественные параметры, включая ОБ-50, сравнивали по *t*-критерию Стьюдента, а также использовали критерий ТМФ, *U*-критерий Вилкоксона–Манна–Уитни и медианный критерий χ^2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ

Серия 1. Оценка психофизиологического состояния крыс после **трехкратного** низкоинтенсивного

СВЧ облучения от трех несущих в диапазоне частот 1–3.6 ГГц. Опыты поставлены на 36 самцах крыс, поделенных на основании предварительного тестирования из 30 предъявлений на две равноценные по числу УРИ группы по 18 особей в каждой. Тестирование в челночной камере проводили в период последствия на сроки в 1, 12, 27 и 45 суток. Сеанс выработки УРИ состоял из 50 циклов чередования условного и безусловного раздражителей.

В результате эксперимента установлено, что по тесту выработки условного оборонительного рефлекса в челночной камере влияние низкоинтенсивного импульсно-модулированного ЭМИ от трех несущих частот в указанном диапазоне оказывает четко выраженное и достаточно пролонгированное психотропное действие. Основные интегративные и динамические показатели обучаемости крыс представлены в табл. 1. Показано, что крысы опытной группы при формировании условного рефлекса избегания проявляют более высокую организованность в сравнении с контролем. Так, животные этой группы быстрее входят в тест, о чем свидетельствует укорочение лаг-фазы на 30–60% на 1-е, 12-е и 45-е сутки испытания, реже стрессируют и отказываются от побежек, уменьшая при этом показатель числа крыс с отказами. В динамике обучения крысы подопытной группы к концу каждого сеанса обучения достигают более высокого уровня обученности, о чем свидетельствует нарастание числа УРИ в виде тенденции (1-е и 27-е сутки) или высокодостоверных различий (12-е и 45-е сутки). Следует отметить, что нарастание числа УРИ идет преимущественно за счет доли медленных рефлексов избегания, что отражает ослабление эмоциональной компоненты реакции (страх, паника) на безусловный раздражитель и способность животных контролировать время до его подачи (обострение внимания). Положительная динамика процесса обучения условному рефлексу прослеживается и по показателю ОБ-50: число попыток до 50%-ного уровня обученности к 45-м суткам периода последствия уменьшается более, чем на 50%. Относительная скорость прироста обученности, рассчитанная по В-коэффициенту регрессии отношения успешных попыток к неуспешным (У/Н), статистически значимо превосходит эти показатели контрольных животных во все сроки тестирования, достигая максимального значения к 45-му дню наблюдения. Об отсутствии нарушений краткосрочной и долговременной памяти и даже их улучшении свидетельствуют показатели “серийности” воспроизведения рефлекса (число серий более пяти УРИ подряд) и степень консолидации навыка (СКН). Так, серии из пяти УРИ подряд к концу опыта (45 суток) выявлялись почти у 90% крыс против 50% в контроле. О сохранении памятного следа на достаточно

Таблица 1. Основные показатели обучаемости крыс-самцов после 3-кратного воздействия низкоинтенсивного импульсно-модулированного ЭМП от трех излучателей в диапазоне 1.05–3.6 ГГц ($M \pm m$)**Table.** Basic indicators of training of male rats after 3-fold exposure to low-intensity pulse-modulated EMF from three emitters in the range of 1.05–3.6 GHz ($M \pm m$)

Сроки, сут	Группа	Лагфаза	Количество УРИ		Количество перебежек	Отказы	ОБ-50	Число крыс с сериями УРИ	Относительная скорость обучения	СКН, %
			общее	медленных						
1	К	15.1 ± 4.6	10.5 ± 3.1	5.0 ± 1.7	31.8 ± 3.2	7.7 ± 2.8	135 ± 31	3/13	100.0 ± 7.1	
	О	10.3 ± 2.7	16.1 ± 3.0	8.9 ± 1.5	29.8 ± 2.2	4.1 ± 1.2	99 ± 32	7/18	121.4 ± 7.1	
12	К	11.2 ± 3.3	18.2 ± 3.6	9.2 ± 1.8	26.8 ± 3.1	5.1 ± 1.9	75 ± 16	7/18	100.0 ± 2.1	11.0 ± 3.9
	О	5.4 ± 1.8	26.5 ± 2.7*	15.1 ± 1.5*	21.3 ± 2.5	2.2 ± 0.6	45 ± 5*	16/18 ^a	375.0 ± 20.8*	25.6 ± 15.3
27	К	5.5 ± 2.0	22.1 ± 3.7	10.5 ± 2.1	24.1 ± 3.2	3.8 ± 1.6	64 ± 23	10/18	100.0 ± 6.7	18.9 ± 6.4
	О	5.9 ± 2.2	27.6 ± 3.4	13.2 ± 1.9	20.5 ± 3.0	1.9 ± 0.8 ^u	40 ± 8	12/17	200.0 ± 8.3*	11.4 ± 3.6
45	К	11.9 ± 3.6	22.0 ± 3.5	10.2 ± 1.9	23.1 ± 2.4	4.9 ± 1.9	56 ± 10	9/18	100.0 ± 11.3	8.0 ± 2.9
	О	3.6 ± 1.0*	34.0 ± 2.0*	20.2 ± 1.6*	15.5 ± 2.0*	0.5 ± 0.4*	24 ± 2*	16/17 ^a	620.8 ± 26.4*	18.6 ± 8.0

Примечание. * $p < 0.07$ по t -критерию Стьюдента; * $p < 0.05$ по t -критерию Стьюдента; а – достоверные различия по альтернативному t -критерию; u – достоверные различия по U -критерию Вилкоксона–Манна–Уитни. В группах по 18 крыс.

длительный срок (приблизительно до 2 нед) у подопытных крыс свидетельствует увеличение почти в 2 раза расчетного показателя СКН.

Серия 2. Влияние 4-кратного воздействия широкополосного (девять несущих) импульсно-модулированного ЭМП на воспроизведение выработанного условного оборотительного рефлекса (долгосрочную память). Во второй серии опытов изучалось воздействие ЭМП на консолидацию памятного следа и извлечение из долгосрочной памяти полученной информации, т. е. способность к воспроизведению предварительно выработанного рефлекса. Опыты поставлены на 54 самцах крыс Вистар массой 230–250 г. Согласно схеме эксперимента были отобраны способные к обучению в челночной камере животные по 30 предъявлениям первичного тестирования. Отобранные для опыта крысы на протяжении 2 мес. обучались избеганию удара электрическим током в челночной камере с интервалами между сеансами тестирования в 4–5 дней. Всего проведено 12 сеансов обучения по 50 предъявлений. Усредненные показатели числа УРИ за последние четыре тестирования считались фоновыми. Обученные животные были разделены на три равноценные по итоговым показателям обученности группы, две из которых подвергались воздействию ЭМИ, а третья – ложному облучению (контроль).

Облучение животных осуществляли от девяти несущих в диапазоне 1.05–2.0 ГГц при суммарной ППЭ в импульсе 300 мкВт/см² с равномерным распределением мощности от всех излучателей. ЭМП модулировалось 30-секундными посылка-

ми импульсов, длительностью 25 мс в режиме свиппа с частотой 3 → 0.3 и 3 → 1 Гц (1 и 2 группы соответственно). Экспозиция составляла 30 мин. Проведено четыре сеанса облучения с интервалом в 7 дней между сеансами, во время которого (за 2 сут до последующего воздействия) проводили тестирование на воспроизведение УРИ в челночной камере. Анализ процесса обучаемости на протяжении всего эксперимента показал, что динамика нарастания числа УРИ у опытных крыс после воздействия ЭМП отличается от группы контроля, что более выражено при частоте модуляции 3 → 1 (рис. 1). В этой группе выявлено достоверное снижение числа УРИ по отношению к своему фону после первого сеанса облучения и отсутствие прироста этого показателя при последующих трех сеансах тестирования. Некоторое снижение в виде тенденции числа УРИ по отношению к своему фону отмечалось и в 1-й группе, несколько отличающейся по характеру модуляции, но при последующих тестированиях динамика прироста УРИ в этой группе в целом соответствует динамике процесса обучения контрольной группы. По остальным показателям обучаемости статистически значимых различий между подопытными и контрольной группой не было выявлено.

Серия № 3. Исследование психофизиологического состояния крыс после хронического воздействия низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного ЭМИ СВЧ. Хроническое воздействие ЭМИ изучали на предварительно обученных крысах (до 60–70% успешных попыток). С этой целью до начала сеансов воздействия ЭМИ было проведено 5-кратное (опыт 1) и 6-кратное

(опыт 2) тестирование в челночной камере с интервалом в 2–3 дня. Показатели обучаемости последнего сеанса тестирования принимались за фоновые. Далее животных делили на три равноценные (по показателям фона) группы, две из которых подвергались СВЧ-воздействию (опытные), а третья – ложному облучению (контроль). Поставлено два опыта (по 45 животных в каждом) при разных режимах облучения, отличающихся лишь параметрами свиппированной импульсной модуляции (3 → 1 в первом опыте и 6 → 1 Гц – во втором). В обоих опытах крысам предъявлено по 40 сеансов облучения от 10 несущих в диапазоне частот 2–4 ГГц. Ежедневная экспозиция (5 раз в неделю по рабочим дням) составляла 2 ч. Таким образом, период хронического воздействия длился около 2 мес. Тестирование на обучаемость проводили в период облучения (через 15, 30 и 40 сеансов в опыте 1 и через 11, 30 и 40 сеансов в опыте 2), оценивая его возможное влияние на устойчивость выработанного навыка, и в период последействия (через 7, 14, 30 и 60 сут от последнего сеанса облучения). Влияние ЭМИ на каждый срок тестирования оценивали по разнице изменений между контролем и опытом, полученной в результате алгебраического суммирования индивидуальных отклонений показателей от своих фоновых [23]. Достоверность различий определяли по *t*-критерию Стьюдента.

Анализ полученных результатов не выявил статистически значимых различий по показателям конечной результативности обучения между опытными и контрольной группами животных при обоих вариантах режима воздействия. Однако тонкий анализ структуры поведения и динамики процесса обучаемости и воспроизведения навыка в период облучения и последействия позволяет выявить некоторые изменения определенной направленности (рис. 2). Так, уже через 11–15 сеансов облучения и до окончания этого периода выражена тенденция к нарушению процесса воспроизведения выработанного рефлекса и отсутствию прироста обученности по сравнению с фоном. Это прослеживается по показателям числа УРИ, особенно быстрых, удлинению лаг-фазы, увеличению числа отказов и межсигнальных перебежек, запаздыванию стадии стабилизации “работы”, о чем свидетельствуют увеличение числа попыток до серии из пяти и более УРИ подряд (показатель обученности), а также увеличение числа серий с одновременным укорочением их длительности. В период последействия выявленные отклонения по скоростным параметрам и стабильности работы в опытных группах сглаживаются, а через 2 мес. у крыс подопытной группы № 1 по ряду показателей обнаруживается даже некоторая стимуляция процесса накопления УРИ. Описанные различия выражены в виде тенденции. Их можно охарактеризовать как некото-

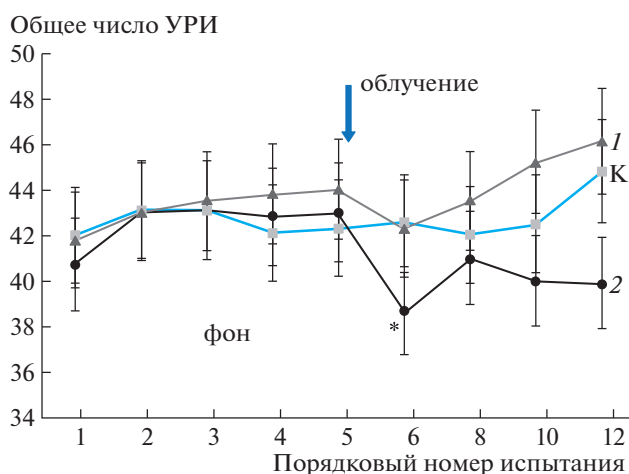


Рис. 1. Влияние четырехкратного воздействия низкочастотного импульсно-модулированного ЭМП от девяти несущих частот в диапазоне 1.05–2.0 ГГц на воспроизведение и динамику условного рефлекса избегания у крыс. 1 – импульсная модуляция 3 → 0.3 (режим 1); 2 – импульсная модуляция 3 → 1 (режим 2); Стрелкой показано начало периода воздействия ЭМИ – 1-й сеанс облучения.

*Статистически значимое различие ($p \leq 0.05$) с группой контроля по *t*-критерию Стьюдента.

Fig. 1. Influence of fourfold influence of low-intensity pulse-modulated EMF from 9 carrier frequencies in the range of 1.05–2.0 GHz on reproduction and dynamics of conditioned reflex of avoidance in rats. 1 – pulse modulation 3 → 0.3 (mode 1); 2 – pulse modulation 3 → 1 (mode 2); The arrow shows the beginning of the period of exposure to EMR – the 1st session of irradiation.

* Statistically significant difference ($p \leq 0.05$) with the control group by Student's *t*-criterion.

рое увеличение вариабельности тестируемых показателей. Однако они имеют место при обоих режимах воздействия и свидетельствуют о том, что длительное хроническое ЭМИ в указанных режимах и условиях облучения может привести к некоторому угнетению процесса воспроизведения выработанного навыка, быстро восстанавливающегося в периоде последействия.

ОБСУЖДЕНИЕ

Многократное и хроническое воздействие сложноорганизованного ЭМП, предположительно близкого к параметрам реального функционирования мобильной связи в условиях “электромагнитного загрязнения” окружающей среды, может вызывать аномальные для столь низких энергий функциональные проявления со стороны ЦНС в виде нестабильности психофизиологического статуса и поведения. Поликритериальная оценка психофизиологического статуса подопытных крыс в целом свидетельствует об отклонениях в виде неустойчивости эмоциональной сферы, нестабильности поведения, снижения внимания, краткосрочной и долгосрочной памяти, затормаживающие процессы выработки и закрепления условно-рефлекторных связей (ко-

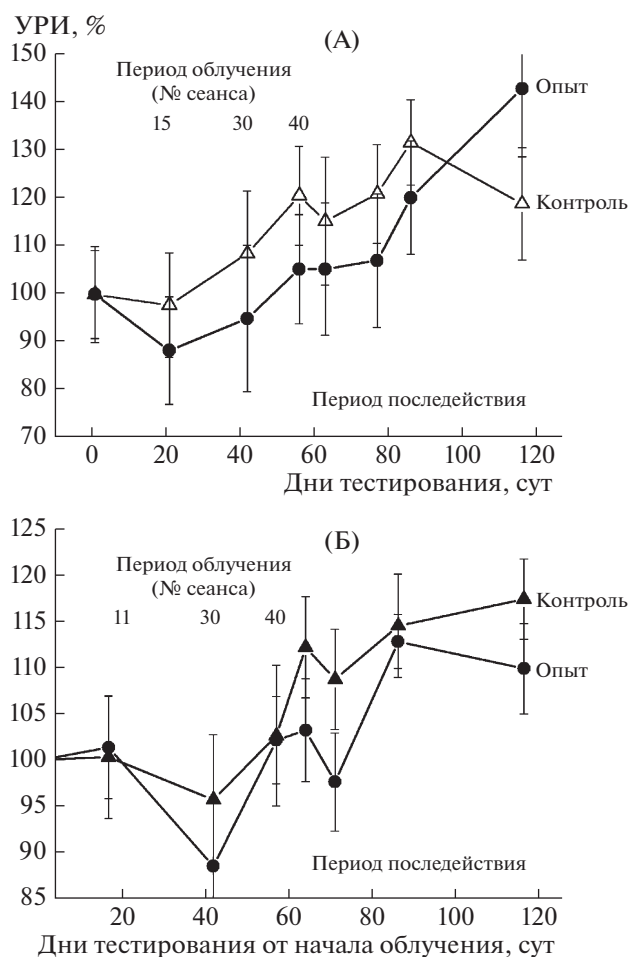


Рис. 2. Динамика обучаемости крыс по тесту числа УРИ в периоды хронического воздействия и последующего остаточного эффекта низкоинтенсивного импульсно-модулированного ЭМП от 10 несущих частот в диапазоне 2–4 ГГц. А – импульсная модуляция 3 → 1 (опыт 1), Б – импульсная модуляция 6 → 1 (опыт 2). Облучение составляло 40 сеансов по 2 ч ежедневно по рабочим дням; ППЭ_{ср.} ~ 40 мкВт/см², ППЭ в импульсе – 300 мкВт/см².

Fig. 2. The dynamics of the learning ability of rats on the test the number of URI during periods of chronic exposure, and the residual effect of low intensity pulse-modulated electromagnetic field from the 10 carrier frequencies in the range of 2–4 GHz. A – pulse modulation 3 → 1 (experiment 1), B – pulse modulation 6 → 1 (experiment 2). The irradiation was 40 sessions for 2 hours daily on working days; Sep. ~ 40 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, TPP pulse to 300 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$.

гнитивные функции), что, в конечном итоге, сказывается на обучаемости. Следует отметить, что эти явления, как и при однократных кратковременных воздействиях, транзиторны и при нашей постановке опытов не достигают уровня высокой клинической значимости.

Несмотря на выявленную разнонаправленность отклонений процесса обучаемости, нельзя не признавать факт их проявления за счет воздействия на ткань мозга. Экспериментальными исследованиями последних лет [24, 25] показана

прямая зависимость между величиной удельной поглощенной энергии после хронического воздействия мобильных телефонов и количеством измененных нейронов в тканях мозга. Работами других авторов [26–28] делается вывод о действии ЭМИ диапазона сотовой связи на нервные информационные пути и на области головного мозга, обеспечивающие процессы запоминания.

Показано, что предварительное обучение крыс ослабляет стрессовое влияние хронического ежедневного воздействия ЭМИ (серия 3), оно выявляется в основном на первых этапах периода облучения с последующим сглаживанием негативных явлений и включением механизмов адаптации, что согласуется с рядом исследований последних лет о гормезисном свойстве низкоинтенсивного ЭМИ радиочастот [29, 30]. Редкие сеансы облучения при сходных параметрах воздействия (серия 2) могут приводить к отклонениям со стороны ЦНС после каждого сеанса в связи с отсутствием своевременного подкрепления памятного следа.

ВЫВОДЫ

1. Многократное и хроническое воздействие сложноорганизованного ЭМП, предположительно близкого к параметрам реального функционирования мобильной связи в условиях “электромагнитного загрязнения” окружающей среды, может вызывать аномальные для столь низких энергий функциональные проявления со стороны ЦНС в виде нестабильности психофизиологического статуса и поведения.

2. Предварительное обучение навыкам (опыт), подготовка к стрессовой ситуации повышают резистентность ЦНС к воздействию низкоинтенсивного ЭМИ диапазона сотовой связи и сглаживают негативный эффект при хроническом его воздействии, что имеет большое значение при отборе профессионала для обслуживания СВЧ-установок.

3. Учитывая особенности детского организма, несовершенство и повышенную лабильность его ЦНС, необходимо проведение подобных экспериментальных долговременных (до 1 года и более) исследований на молодых неполовозрелых особях животных с целью нормирования использования мобильной связи.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научно-исследовательского проекта РФФИ № 18-413-40004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А., Иванов А.А. и др. Аутоиммунные процессы после пролонгированного воздействия электромагнитных полей малой

- интенсивности (результаты эксперимента). Сообщения 1, 2, 3, 4, 5 // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. № 1. С. 5–36. [Grigoriev Yu.G., Grigoriev O.A., Ivanov A.A. et al. Autoimmune processes after prolonged exposure to electromagnetic fields of low intensity (experimental results). Messages 1, 2, 3, 4, 5 // Radiation biology. Radioecology. 2010. V. 50. № 1. P. 5–36. (In Russian)]
2. Григорьев Ю.Г., Лукьянова С.Н., Макаров В.П. и др. Двигательная активность кроликов в условиях хронического импульсного облучения микроволнами низкой интенсивности // Радиационная биология. Радиоэкология. 1995. Т. 35. № 1. С. 29–35. [Grigoriev Yu.G., Lukyanova S.N., Makarov V.P. et al. Motor activity of rabbits in the conditions of chronic pulse irradiation by microwaves of low intensity // Radiation biology. Radioecology. 1995. V. 35. № 1. P. 29–35.]
 3. Ростовцева Г.Г., Судонина Л.Л., Якуб И.Л. и др. К вопросу об астенических состояниях у лиц, подвергшихся воздействию полей радиочастот // Гигиена труда и биологическое действие электромагнитных волн радиочастот. М., 1972. С. 18–19. [Rostovtsev G.G., Adonina L.L., Yacoub I.L. et al. To the question of asthenic States in individuals exposed to radiofrequency fields // Hygiene of labor and biological effect of electromagnetic waves of radio frequencies. M., 1972. P. 18–19. (In Russian)]
 4. Рышков В.В. Влияние низкоинтенсивного микроволнового облучения в непрерывном режиме на поведение белых крыс // Радиобиология. 1985. № 1. С. 114–116. [Rynskov V.V. Influence of low-intensity microwave irradiation in continuous mode on the behavior of white rats // Radiobiology. 1985. № 1. P. 114–116. (In Russian)]
 5. Thomas S., Heinrich S., von Kries R., Radon K. Exposure to radio-frequency electromagnetic field and behavioral in Bavarian children and adolescent // Eur. J. Epidemiol. 2010. V.25. № 2. P. 135–141.
 6. Lai H., Horita A., Choy C.K. et al. Low-level microwave irradiation attenuates naloxone-induced withdrawal syndrome in morphine-dependent rats // Pharmacol. Biochem. Behav. 1986. V. 24. № 1. P. 151–153.
 7. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018. 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Quantitative criteria of microwave lesion. M.: GEOS. 2018, 232 p. (In Russian)]
 8. Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В. и др. Экспериментальная оценка реакций ЦНС на воздействие импульсных ЭМИ низкой интенсивности // Радиация и риск. 2010. Т. 19. № 3. С. 104–119. [Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V. et al. Experimental evaluation of CNS reactions to the impact of pulsed EMR of low intensity // Radiation and risk. 2010. V. 19. № 3. P. 104–119. (In Russian)]
 9. Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В., Павлова Л.Н. и др. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМП низкой интенсивности на общую возбудимость ЦНС // Радиация и риск. 2011. Т. 20. № 2. С. 64–74. [Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V., Pavlova L.N. et al. Influence of broadband pulse-modulated EMF of low intensity on the General excitability of the Central nervous system // Radiation and risk. 2011. V. 20. № 2. P. 64–74. (In Russian)]
 10. Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В. Влияние низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного электромагнитного поля на когнитивные функции мозга // Радиация и риск. 2013. Т. 22. № 2. С. 91–100. [Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V. Influence of low-intensity broadband pulse-modulated electromagnetic field on cognitive brain functions // Radiation and risk. 2013. V. 22. № 2. P. 91–100. (In Russian)]
 11. Павлова Л.Н., Дубовик Б.В., Жаворонков Л.П., Лушников Г.А. Влияние широкополосного импульсно-модулированного ЭМИ СВЧ низкой интенсивности на крыс Вистар с высокой организацией адаптивного поведения // Радиация и риск. 2016. Т. 25. № 2. С. 67–78. [Pavlova L.N., Dubovik B.V., Zhavoronkov L.P., Lushnikova G.A. Influence of broadband pulse-modulated EMR microwave of low intensity on Wistar rats with high organization of adaptive behavior // Radiation and risk. 2016. V. 25. № 2. P. 67–78. (In Russian)]
 12. Лукьянова С.Н. Электромагнитное поле СВЧ диапазона нетепловой интенсивности как раздражитель для центральной нервной системы. М.: ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, ФМБА России, 2015. 200 с. [Lukyanova S.N. The electromagnetic field of the microwave range of non-thermal intensity as an irritant for the Central nervous system. M.: Center named after them. A. I. Burnazyan, FMBA of Russia, 2015. 200 p. (In Russian)]
 13. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. М.: Экономика, 2016. 567 с. [Grigoriev Yu.G., Grigoriev O.A. Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard prediction. M.: Economics, 2016. 567 p. (In Russian)]
 14. Hosking B. Preliminary report: symptoms associated with mobile phone use // Occup. Med. 1998. V. 48. № 6. P. 357–360.
 15. Muscat J., Malkin M., Shore R. et al. Handheld cellular telephones and the risk of acoustic neuroma // Neurology. 2002. V. 58. № 8. P. 1304–1306.
 16. Schuz J., Jacobsen R., Olsen J.H. et al. Cellular telephone use and cancer risk: update of nationwide Danish cohort // Natl. Cancer Inst. 2006. V. 98. P. 1707–1713.
 17. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В. Психфизиологические показатели детей-пользователей мобильной связью. Сообщение 2. Результаты четырёхлетнего мониторинга // Радиационная биология. Радиоэкология. 2011. Т. 51. № 5. С. 617–623. [Khorseva N., Grigoriev Yu.G., Gorbunova N.V. Psychophysiological indicators of children-users of mobile communication. Message 2. Results of four-year monitoring // Radiation biology. Radioecology. 2011. V. 51. № 5. P. 617–623. (In Russian)]

18. Васильева Т.И., Добрикова Е.А. Влияние электромагнитных полей сотового телефона на адаптационные процессы организма человека // VI съезд по радиационным исследованиям: Тез. докладов. Т. 2. М., 2010. С. 164. [*Vasilyeva T.I., Dobryakova E.A. the Influence of electromagnetic fields of a cell phone on the adaptation processes of the human body // VI Congress on radiation research: abstracts. V. 2. M., 2010. S. 164.*]
19. Семёнова Т.П., Медвинская Н.И., Блисковка И.Г. и др. Влияние электромагнитного излучения на эмоциональное поведение крыс // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т. 40. № 6. С. 693–695. [*Semenova T.P., Medvinskaya N., Bliskavka I.G. et al. Influence of electromagnetic radiation on emotional behavior of rats // Radiation biology. Radioecology. 2000. V. 40. № 6. P. 693–695. (In Russian)*]
20. Павлова Л.Н., Дубовик Б.В., Жаворонков Л.П., Глушакова В.С. Экспериментальное обоснование возможных механизмов влияния электромагнитных полей (ЭМП) низкой интенсивности на поведение животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 4. С. 388–393. [*Pavlova L.N., Dubovik B.V., Zhavoronkov L.P., Glushakova V.S. Experimental study of possible mechanisms of influence of electromagnetic fields (EMF) of low intensity on animal behavior // Radiation biology. Radioecology. 2012. V. 52. № 4. P. 388–393. (In Russian)*]
21. Euroguide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. London: FELASA, 2007.
22. Frochlich H. Long-range coherence and energy storage in biological system // *Int. Quant. Chem.* 1968. V. 2. P. 64.
23. Навакатикян М.Ф. Методика изучения оборонительных условных рефлексов активного избегания // *Журн. высшей нервной деятельности.* 1992. Т. 42. № 4. С. 812–818. [*Navakatikyan M.F. Method of studying defensive conditioned reflexes of active avoidance // Journal of higher nervous activity. 1992. V. 42. № 4. P. 812–818. (In Russian)*]
24. Salford L., Brun A., Eberhardt J. et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones // *Environ. Health Perspect.* 2003. V. 111. № 71. P. 881–883.
25. Salford L., Nitby H., Brun A. et al. Non-thermal effects of EMF upon the mammalian brain: the Lund Experience // *Environment.* 2007. V. 27. № 4. P. 493–500.
26. Nitby H., Grafstrom G., Tian et al. Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile phone radiation // *Bioelectromagnetics.* 2008. V. 29. № 3. P. 219–232.
27. Либерман А.Н., Денисов С.Г. Мобильный телефон и здоровье. М.: МГУ, 2011. 86 с. [*Lieberman A.N., Denisov S.G. Mobile phone and health. M.: Moscow State University, 2011. 86 p. (In Russian)*]
28. Fragopoulou A., Koussoulakos L., Margaritis L. Cranial and postcranial skeletal variations induced in mouse embryos by mobile phone radiation // *Pathophysiology.* 2010. V. 17. № 3. P. 169–177.
29. Sun C., Wei X., Fei Y. et al. Mobile phone signal exposure triggers a hormesis-like effect in Atm+/+ and Atm-/- mouse embryonic fibroblasts // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. P. 37423.
30. Jargin S.V. Hormesis and radiation safety norms: Comments for an update // *Hum. Exp. Toxicol.* 2018. V. 37. P. 1233–1243.

Influence of Multiple and Chronic Exposure to Electromagnetic Radiation of the Mobile Communication frequency Range on the Behavior and Cognitive Functions of the Rat Brain

L. N. Pavlova^{a, #}, O. I. Kolganova^a, O. S. Izmestyeva^a, V. V. Panfilova^a, and L. P. Zhavoronkov^a

^a A. Tsyb Medical Radiological Research Center – branch of the National Medical Research Radiological Center of the Ministry of Health of the Russian Federation, Obninsk, Russia

[#]E-mail: pavlova.ln@inbox.ru

In three series of experiments on Wistar rats the influence of three-fold (4–5 days), four-fold (1 time per week) and chronic (40 sessions of 2 hours per day) effects of broadband low-intensity pulse-modulated electromagnetic field on the production, consolidation and reproduction of conventional defensive avoidance reflex was studied. The parameters of electromagnetic radiation exposure in all cases were chosen in accordance with the actual functioning of mobile communication in the conditions of modern overload (“pollution”) of the biosphere by electromagnetic fields. Irradiation was carried out in an anechoic chamber using a different number of carriers (3, 9 and 10) from a block of generators with frequencies from 1 to 4 GHz, with a total PPE pulse of 300 mW/cm², pulse duration of 25 MS and modulating swiped pulse in the EEG frequency range (from 1 to 6 Hz). Anomalous phenomena in the form of cognitive impairment, instability of behavior in the learning process, deviations from the short-term and long-term memory are revealed. The impact of electromagnetic radiation on the Central nervous system can be multidirectional, which ultimately adversely affects the learning process. These phenomena are transient and do not reach the level of high clinical significance. It is shown that pre-repeated testing (“training”) smoothes the negative effect of chronic exposure to electromagnetic radiation and accelerates the adaptation process.

Keywords: Wistar rats, chronic irradiation, low-intensity non-ionizing radiation, mobile frequency range, Shuttle box, behavior, conditioned defensive reflex, training