

НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 537.8:599.323.4:591.3:57.084.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ХРОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДИАПАЗОНА МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ В АНТЕНАТАЛЬНОМ ПЕРИОДЕ РАЗВИТИЯ КРЫС

© 2020 г. О. С. Измestьева^{1,*}, Л. Н. Павлова¹, Л. П. Жаворонков¹

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

*E-mail: olgaizmestieva@mail.ru

Поступила в редакцию 06.06.2019 г.

В опытах на крысах Вистар проведена оценка последствий хронического воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения (ЭМИ) диапазона сотовой связи (1–4 ГГц) в сочетании с многочастотным импульсно-модулированным электромагнитным “шумом” на модели эмбриотоксических эффектов и анализа постнатального развития облученного потомства. В работе показано, что при отсутствии видимой патологии беременности и родов у облученного потомства в постнатальном онтогенезе регистрируются отклонения в состоянии центральной нервной системы. Функциональный дефицит проявился в виде эмоциональной неустойчивости, снижении двигательной компоненты ориентировочно-исследовательской реакции и, как следствие, – снижении когнитивных функций.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, сотовая связь, антенатальный период развития, соматическое и психофизиологическое развитие, функциональный дисбаланс

DOI: 10.31857/S0869803120010099

В организме человека и животных многие физиологические процессы, такие, как внутриклеточные взаимодействия, межклеточные связи, биологические ритмы и многие физиологические процессы в организме сопровождаются перемещением заряженных частиц, например, при работе ионных каналов в мембранах клеток. По этой причине “внешние электромагнитные поля могут в ряде случаев выступать как источники электромагнитных помех, снижающих надежность жизненных процессов человека” [1, 2]. Этот факт приобретает особую актуальность в связи с беспрецедентным ростом суммарной напряженности электромагнитного поля (ЭМП) и интенсивности неионизирующих электромагнитных излучений (ЭМИ), глобальным внедрением в повседневную жизнь сотовой связи [3]. Сложившуюся ситуацию в мире Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) охарактеризовала как “электромагнитное загрязнение окружающей среды”. В опубликованной литературе имеются указания на то, что частое и длительное по времени использование сотовых телефонов повышает риск развития не только функциональных расстройств со стороны нервной системы и слухового анализатора [4–7], но и способствует

развитию опухолей мозга и внутреннего уха [8]. Повышенный риск развития опухолей мозга регистрировали преимущественно в группе молодых пользователей 20–29 лет [9, 10], в то время как для старших возрастных категорий таких закономерностей не отмечали. На основании многочисленных данных Международное агентство ВОЗ по исследованию рака классифицировало радиочастотное ЭМИ как возможный канцерогенный фактор. По результатам многочисленных эпидемиологических исследований хотя и представлены противоречивые заключения о статистической достоверности выявленных отклонений в развитии детей, тем не менее, делается вывод об имеющейся связи между воздействием ЭМИ сотовых телефонов и проблемами в общем и психофизиологическом развитии подростков и детей [11–13].

В России Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений (РНКЗНИ) рекомендует максимально ограничить использование сотовых телефонов детьми и подростками до 16 лет, а также беременными.

В связи с этим считаем целесообразным в модельных экспериментах оценить последствия хронического ЭМИ-воздействия в режимах,

близких к диапазону сотовой связи. С этой целью в опытах на крысах производили хроническое облучение в антенатальном периоде развития (посредством облучения беременных самок) с последующей оценкой эффектов ЭМИ в пострadiaционном онтогенезе. Основной предпосылкой использования данного подхода является высокая радиочувствительность организма в период интенсивной пролиферации и морфологического созревания на стадии эмбрионального развития. Ранее в опубликованных нами работах [14, 15] в опытах на крысах при использовании доз ионизирующей радиации от 20 до 40 сГр, приходящихся на сопоставимые этапы развития мозга, показано воспроизведение радиоэмбриологических эффектов и поведенческой тератологии в сопоставимых с эффектами у человека дозовых пределах и качественных проявлениях.

В работе представлены результаты комплексного исследования на крысах, позволяющие оценить физиологическое состояние организма в антенатальном онтогенезе, после хронического СВЧ-воздействия в период внутриутробного развития.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Опыты проведены на крысах Вистар, полученных из питомника “Столбовая” – филиал ФГБУН “Научный центр биомедицинских технологий Федерального медико-биологического агентства”. Половозрелых самок (возраст 3.5 мес., масса тела 230 ± 10 г) после верификации у них беременности по общепринятой методике [16] подвергали воздействию хронического облучения в безэховой камере в условиях климатического комфорта. В течение всего эксперимента, в том числе в период облучения, животные содержались в стандартных условиях крупного лабораторного вивария и на стандартном рационе питания на основе брикетированных кормов, имея свободный доступ к воде и корму. Все работы с животными выполняли в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов о порядке экспериментальной работы и гуманном отношении к животным [17].

Облучение животных производили в зоне сформированной волны источника электромагнитного излучения. При этом использовали два режима СВЧ-облучения, отличающиеся частотным диапазоном, которые создавались блоком из 10 генераторов, а именно – 1–2 ГГц с шагом несущей частоты 0,1 ГГц (режим 1) или 2–4 ГГц с шагом 0,2 ГГц (режим 2). Длительность импульса составила 25 мс с суммарной пиковой мощностью – до 1000 мкВт/см^2 при равном вкладе несущих. Частота следования импульсов была в пределах ведущих частот электроэнцефалограммы (≤ 6 Гц), что обеспечивало значение средней плотности

потока энергии не выше 100 мкВт/см^2 . Облучение или ложное облучение проводили ежедневно по 2 ч в течение всего периода беременности (20 дней).

Эффекты многократного действия ЭМП тестировали по критериям внутриутробной гибели плода, динамики массы тела и жизнеспособности крысят в раннем пострadiaционном онтогенезе, спонтанной двигательной активности по тесту “открытое поле”, физической динамической работоспособности по длительности бега в третбане и способности животных к обучению по характеру формирования и воспроизведения условно-рефлекторной реакции избегания (УРИ) на модели оборонительного рефлекса.

Все использованные тесты по оценке физиологического состояния организма в пре- и постнатальном онтогенезе проводили в соответствии с методическими рекомендациями, прописанными в руководствах по доклиническому испытанию препаратов и гигиеническому нормированию [18].

Результаты исследований обработаны методами вариационной статистики с использованием параметрического t -критерия Стьюдента и точного метода Фишера (ТМФ). При анализе эффектов на обучаемость в тесте УРИ также применены: регрессионный анализ, U -критерий Вилкоксона–Манна–Уитни, медианный критерий χ^2 . Различия считали значимыми при $p < 0.05$. Статистический анализ проводился с помощью программы Origin 6.0 (“MicroCal Software”, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Течение беременности и родов у групп крыс, облученных в режимах 1 и 2, не отличались от показателей контрольной группы животных (табл. 1). Число крысят в помете, а также их суммарная по помету масса на все исследуемые сроки не отличались от показателей контроля. При анализе соматического развития крысят в пострadiaционном онтогенезе (табл. 2) следует отметить, что животные, облученные в антенатальном периоде в режиме 1, за 30 дней наблюдения относительно быстрее набирали массу тела. В то же время по остальным показателям развития раннего постнатального онтогенеза – сроки прорезывания зубов, покрытие шерстью и прозревание – животные трех групп между собой не отличались. Из этого следует, что существенного влияния на беременность и раннее развитие ЭМИ в использованных режимах не оказывало.

Тест принудительного бега крыс в возрасте 1.5 мес. по дорожке третбана до полного утомления (отказ от бега, несмотря на электрокожную стимуляцию) позволяет оценить *физическую выносливость* животных, интегрально характеризу-

Таблица 1. Основные показатели течения беременности и родов у крыс, подвергнутых воздействию многочастотного импульсно-модулированного ЭМИ в диапазоне частот 1–2 ГГц (режим № 1) и 2–4 ГГц (режим № 2) в течение всей беременности

Table 1. The main indicators of pregnancy and childbirth in rats exposed to multi-frequency pulse-modulated EMR in the frequency range 1–2 GHz (mode № 1) and 2–4 GHz (mode № 2) throughout pregnancy

Группа животных	Прибавка массы тела самки, %	Потеря массы тела самки за роды, %	Потеря массы на одного крысенка, %	Количество плодов в помете	Вес крысят при рождении, г
Контроль	27.7 ± 3.1 n = 13	2.9 ± 0.6 n = 8	0.57 ± 0.12 n = 8	7.4 ± 1.3 n = 10	5.63 ± 0.40 n = 10
Режим № 1	32.8 ± 2.8 n = 11	4.7 ± 1.8 n = 7	0.52 ± 0.18 n = 7	7.7 ± 0.5 n = 10	5.52 ± 0.18 n = 10
Режим № 2	32.6 ± 2.5 n = 9	3.9 ± 2.6 n = 5	1.09 ± 0.91 n = 5	7.1 ± 0.9 n = 9	5.75 ± 0.24 n = 9

Примечание. n – число пометов.

Таблица 2. Динамика массы тела крысят (г), подвергнутых хроническому воздействию многочастотного импульсно-модулированного ЭМИ в разных режимах в антенатальном периоде развития

Table 2. Dynamics of body weight of rats (g) irradiated to chronic exposure to multi-frequency pulse-modulated electromagnetic radiation in different modes in the antenatal period of development

Группы	Число животных в группе	Возраст крысят, сут						
		1	3	7	14	21	30	40
Контроль	63	5.63 ± 0.40 (9)	7.14 ± 0.23	14.0 ± 0.5	28.6 ± 0.7	42.8 ± 1.4	♂ 69.0 ± 4.3 n = 26	♂ 118.2 ± 5.6 n = 26
							♀ 70.2 ± 3.3 n = 37	♀ 121.2 ± 4.7 n = 37
Режим № 1	51	5.52 ± 0.20 (10)	7.34 ± 0.29	14.2 ± 0.3	29.4 ± 0.6	43.6 ± 0.78	♂ 84.7 ± 1.9* n = 27	♂ 131.2 ± 5.5 n = 27
							♀ 78.8 ± 2.7* n = 24	♀ 134.6 ± 5.6 n = 24
Режим № 2	48	5.70 ± 0.24 (9)	7.93 ± 0.24	15.6 ± 0.4	29.2 ± 0.7	45.7 ± 1.2	♂ 77.0 ± 3.6 n = 22	♂ 104. ± 5.3 n = 22
							♀ 77.6 ± 2.7 n = 26	♀ 126.7 ± 3.7 n = 26

Примечание. В скобках указано количество пометов; режим 1 – 10 несущих в диапазоне частот 1–2 ГГц с шагом 0.1 ГГц; режим 2 – 10 несущих частот в диапазоне 2–4 ГГц с шагом 0.2 ГГц.

* Отличия от группы “Контроль” статистически значимы (t-критерий Стьюдента (p < 0.05)).

ющую их соматическое состояние. По итогам предварительного тестирования интактных крыс определена скорость протяжки ленты (26 м/мин), позволяющая корректно оценивать физическую выносливость животных.

Данные о продолжительности бега подопытных и контрольных крыс приведены в табл. 3. Следует отметить, что группа крыс, облученных в антенатальном периоде в режиме 2, обладает относительно меньшей физической выносливостью, что регистрируется по значимому снижению средней продолжительности бега у самок, и

тенденции к снижению доли крыс с хорошей выносливостью (бег более 30 мин).

Для режима 1, напротив, зарегистрировано даже увеличение средней по группе продолжительности бега за счет “перехода” части животных из категории “средних” в “выносливые”. Аналогичные эффекты выявлены как у самцов, так и у самок.

Спонтанную двигательную активность (СДА) потомства оценивали в возрасте 2 мес. по тесту “открытого поля” (равномерно освещенный манеж 1 × 1 м, разделенный на 16 квадратов).

Таблица 3. Основные показатели бега крыс, подвергнутых хроническому воздействию сложноорганизованного ЭМИ диапазона частот 1–2 ГГц (режим 1) и 2–4 ГГц (режим 2) в антенатальном периоде развития
Table 3. The main indicators of the running of rats irradiated to the chronic effects of the complexly organized EMR frequency range of 1–2 GHz (mode 1) and 2–4 GHz (mode 2) in the antenatal period of development

Пол	Группа	n	Средняя продолжительность бега (мин)	Число крыс с бегом		
				до 10 мин	11–30 мин	более 30 мин
Самки	контроль	33	31.8 ± 3.3	1	20	12
	режим 1	23	47.9 ± 5.3*	0	6**	17
	режим 2	27	22.8 ± 2.9*	3	20	4
						<i>p</i> = 0.085
Самцы	контроль	26	26.8 ± 3.1	4	15	7
	режим 1	26	38.2 ± 3.6*	1	9	16**
	режим 2	21	22.9 ± 2.4	2	16	3

Примечание. n – число крыс в группах.

* Отличия от группы “Контроль” статистически значимы по *t*-критерию Стьюдента, (*p* < 0.05); ** отличия от группы “Контроль” статистически значимы по χ^2 ($\chi^2 = 6.31, p < 0.05$).

Таблица 4. Основные показатели спонтанной двигательной активности крыс Вистар, подвергнутых многократному СВЧ-облучению в антенатальном периоде развития
Table 4. Main indicators of spontaneous motor activity of Wistar rats irradiated to multiple microwave radiation in the antenatal period of development

Группа	Число животных	Лаг-фаза, с	Количество вставаний	Грумминг	Дефекация	Количество болюсов	Заходы в углы	Число пересечений квадратов
							центральная зона	периферия
Самцы								
Контроль	31	6.7 ± 1.0	10.3 ± 1.5	5.3 ± 0.9	1.2 ± 0.2	12.9 ± 1.7	3.9 ± 0.9	36.6 ± 5.1
Режим 1	26	85.1 ± 33.3*	8.9 ± 1.6	3.6 ± 0.6	2.4 ± 0.3*	10.6 ± 1.7	3.1 ± 0.8	30.8 ± 5.0
Режим 2	21	17.8 ± 7.3	8.0 ± 1.3	5.9 ± 0.7	1.2 ± 0.3	6.6 ± 1.1*	1.6 ± 0.5*	19.6 ± 3.0*
Самки								
Контроль	35	3.5 ± 0.3	12.0 ± 2.4	4.0 ± 0.5	2.1 ± 0.3	11.2 ± 1.7	1.8 ± 0.7	32.4 ± 5.2
Режим 1	24	43.2 ± 27.4*	10.0 ± 1.6	4.3 ± 0.7	2.0 ± 0.4	12. ± 2.1	2.0 ± 0.8	35.2 ± 6.2
Режим 2	28	4.2 ± 0.8	11.6 ± 1.8	4.4 ± 0.6	1.6 ± 0.4	8.3 ± 1.1	1.0 ± 0.3	23.4 ± 3.8

* Отличия от группы “Контроль” статистически значимы (*p* < 0.05).

Крысу помещали в центр поля и визуально в течение двух последовательных 5-минутных интервалов регистрировали ряд параметров локомоторной активности животных, а именно: лаг-фазу (время до начала исследования пространства), грумминг, вертикальную и горизонтальную активность в центральной и периферической зоне манежа, количество заходов в углы и актов дефекации.

Суммарно эти параметры позволяют судить о психоэмоциональном состоянии животных – наличии возбуждения или угнетения, тревожности, страха, активности в условиях равномерно освещенного пространства.

Из данных, представленных в табл. 4, следует, что выявленные различия по сравнению с контролем в параметрах СДА подопытных крыс можно охарактеризовать как заторможенность. Так, у шести из 26 самцов (режим 1) резко увеличен период до первого выхода из центра поля, а две особи не двигались все 10 мин наблюдения. У крыс этой группы увеличено число дефекаций, что говорит о состоянии тревоги. У обеих подопытных групп число передвижений между квадратами уменьшено, эти различия для “режима 2” высоко достоверны.

Таблица 5. Основные показатели выработки условного рефлекса избегания у крыс-самцов, подвергнутых хроническому СВЧ-воздействию в антенатальном периоде развития

Table 5. The main indicators of the development of a conditioned avoidance reflex in male rats irradiated to chronic microwave exposure in the antenatal period of development

Сроки тестирования	Группы	Лаг-фаза	Количество УРИ	Отказы	ОБ-50	Серии из 7 УРИ (число крыс)	Коэффициент регрессии нарастания у/н
Исходный тест	Контроль	19.6 ± 2.9	4.8 ± 0.8	6.1 ± 0.9	202 ± 30	0/25	0.02 ± 0.003
	Реж. 1	15.3 ± 2.8	4.2 ± 0.6	4.3 ± 0.9	308 ± 78	0/26	0.01 ± 0.002
	Реж. 2	15.6 ± 3.1	2.8 ± 0.7	7.4 ± 1.2	738 ± 120	1/20	0.008 ± 0.001*
1-е сутки	Контроль	13.2 ± 2.9	21.4 ± 2.7	6.0 ± 1.8	58.8 ± 6.2	13/25	0.09 ± 0.003
	Реж. 1	9.9 ± 2.4	14.8 ± 2.0	4.5 ± 1.2	80.3 ± 12.5	6/26 &	0.036 ± 0.003*
	Реж. 2	16.0 ± 3.4	14.1 ± 2.9	8.6 ± 2.2	89.5 ± 11.7*	8/20	0.045 ± 0.002*
7-е сутки	Контроль	5.9 ± 1.8	27.2 ± 2.9	7.2 ± 2.3	39.6 ± 4.9	17/25	0.10 ± 0.007
	Реж. 1	8.4 ± 1.8	19.5 ± 2.6	7.1 ± 1.9	65.9 ± 7.4*	12/26	0.07 ± 0.002*
	Реж. 2	5.2 ± 1.5	23.8 ± 3.6	8.0 ± 2.5	49.1 ± 10.7	9/20 &	0.05 ± 0.007*
25-е сутки	Контроль	6.4 ± 2.7	29.9 ± 3.4	4.5 ± 2.2	27.2 ± 7.8	14/22	0.11 ± 0.008
	Реж. 1	7.8 ± 2.2	25.5 ± 3.4	6.0 ± 2.3	44.7 ± 9.0	14/24	0.07 ± 0.004*
	Реж. 2	8.0 ± 3.7	31.6 ± 3.7	5.2 ± 2.3	21.1 ± 4.9	15/20	0.11 ± 0.001

* Отличия от группы “Контроль” статистически значимы (*t*-критерий Стьюдента, $p < 0.05$); & отличия от группы “Контроль” статистически значимы по χ^2 (уровень критерия – 6.78, $p < 0.01$).

Выявленные в опытах на самцах тенденции в целом воспроизводятся и при изучении СДА крыс-самок.

Условно-рефлекторная деятельность. Способность крыс к выработке и воспроизведению условного оборонительного рефлекса избегания (УРИ) тестировали по достижении крысятами возраста 3 мес. в трехканальной челночной камере при следующей последовательности сигналов: свет + звук (условный сигнал) – 4 с, болевое электрическое раздражение – 8 с. Пауза между циклами составляла 20 с. За один сеанс крысам предъявляли по 50 сочетаний условного и безусловного раздражителей, анализируя количество и динамику избегания наказания путем перехода в безопасный отсек бокса. Подопытные группы рандомизировали по результатам предварительных испытаний из 30 попыток.

При анализе выработки и воспроизведения условных реакций избегания (УРИ) использовали ряд показателей, отражающих конечную результативность либо характеризующих скорость обучения. К *интегральным критериям* относили: 1) число пропущенных ударов тока до регистрации первого УРИ – лаг-фаза; 2) количество УРИ и перебежек в другой отсек после удара; 3) число отказов (отсутствие перебежек даже на электрокожное подкрепление); 4) среднее число попыток до серии из пяти и более УРИ подряд (критерий оценки состояния консолидации памятного следа); 5) наличие крыс, имеющих серии УРИ и

среднее число серий за сеанс; 6) среднее по группе значение латентного периода реакций (избегания либо перебежки).

Показатели скорости обучения основаны на оценке параметров кривых линейной регрессии, отражающих нарастание успешных решений (избеганий) в процессе обучения. При многократных испытаниях регрессионный анализ позволяет количественно оценить различия в исходном уровне обученности и скорости обучения (по коэффициентам уравнений регрессии), а также вычислить такие информативные показатели, как степень консолидации навыка (отношение уровня обученности в начале повторного теста к аналогичному показателю в конце предыдущего тестирования) и относительную скорость обучения, определяемую при сравнении наклонов регрессионных кривых у подопытных и контрольных животных в каждый срок испытания. При использовании в качестве функции отношения числа УРИ к числу совершенных попыток вычисляли удобный для сравнения критерий 50% обученности (ОБ-50) с доверительным интервалом. При анализе динамики отношения числа успешных попыток избегания к неуспешным (у/н) применяли пошаговую регрессию по суммарному результату для группы за интервал в десять попыток с шагом в две попытки [19].

Из анализа результатов, представленных в табл. 5, видно, что на срок “1 сут” у крыс обеих подопытных групп регистрируется значимое сни-

жение коэффициента регрессии нарастания успех/неуспех. При этом выявляется в виде тенденции или статистически значимого эффекта уменьшение доли крыс с сериями из семи УРИ и отставание роста расчетного количества попыток до достижения уровня 50% обученности в обеих группах. Выявленное отставание в выработке условного рефлекса избегания, проявляющееся у подопытных крыс по итогам испытаний в первые сутки, более четко проявляется при повторных тестированиях в течение недели и практически исчезает через месяц.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты представленной работы в целом подтверждают ранее опубликованные данные эпидемиологических исследований и свидетельствуют о наличии негативного воздействия ЭМП низкой интенсивности в частотном диапазоне сотовой связи на организм человека и животных в пренатальном периоде развития. Исследование, при котором в комплексе оценивалось состояние потомства, облученного режимами импульсного многочастотного ЭМИ, проведено впервые. Интересным оказался тот факт, что по общеупотребимым показателям, отражающим течение беременности и ранний пострадиационный онтогенез, отклонений у облученного потомства не выявлено. Тем не менее в отдаленные сроки постнатального развития при достижении животными возраста половой зрелости у облученного потомства фиксируется отставание в развитии. Это проявилось в снижении выносливости к физической нагрузке у самок-крыс, облученных в диапазоне частот 2–4 ГГц. Несмотря на разнонаправленность изменений, выявленных в физическом состоянии в пострадиационном онтогенезе, следует отметить сам факт их наличия в отдаленные сроки после низкоэнергетического СВЧ-воздействия. Интегральная оценка психофизиологического статуса подопытных крыс в целом свидетельствует о формировании в постнатальном периоде эмоциональной неустойчивости, снижении двигательной компоненты ориентировочно-исследовательской реакции и, как следствие – снижения когнитивных функций. Выявленные различия в психофизиологическом статусе можно расценивать как отдаленные последствия многократного СВЧ-облучения в диапазоне сотовой связи. Полученные нами закономерности хорошо согласуются с результатами, представленными и другими исследователями при использовании моночастотного (2.4 ГГц) электромагнитного излучения [20]. Из опубликованных работ заслуживает внимание исследование на мелких лабораторных грызунах [21, 22], где показана прямая зависимость между количеством измененных нейронов в тканях мозга и величиной удельной

поглощенной энергии. В ряде независимых исследований авторы приходят к выводу о том, что ЭМИ в диапазоне сотовой связи действует на нервные информационные пути и на области головного мозга, обеспечивающие процессы запоминания [23–25]. Необходимо отметить, ЭМИ в диапазоне сотовой связи может сказываться и на репродуктивном здоровье мужчин. Это предположение основано на результатах экспериментов на животных, когда у потомства облученных самцов регистрировали снижение выработки тестостерона и нарушение сперматогенеза [26, 27]. Одним из возможных механизмов повреждающего действия ЭМП может быть оксидантный стресс, проявление которого в ряде случаев регистрировали по реакции ферментативного звена антиоксидантной системы, росту продуктов окисления белков в гиппокампе крыс [28] и маркеров воспаления в сыворотке крови крыс [29] после длительного ЭМИ-воздействия.

Таким образом, совокупный анализ данных литературы и полученных данных экспериментальных исследований свидетельствует о наличии реакций ведущих функциональных систем развивающегося организма на повторные воздействия ЭМИ нетепловой интенсивности в режимах, близких к параметрам сотовой связи. Регистрируемые сдвиги, как правило, не выходят за пределы, допустимые для эффективных компенсаторных реакций, однако наличие этих реакций в течение достаточно длительного периода может привести к уменьшению функционального “резерва” с последующим развитием соответствующих патологических изменений. Поэтому изучаемый фактор в совокупности с многочастотным электромагнитным “шумом” можно расценить как негативный биотропный фактор внешней среды.

БЛАГОДАРНОСТИ

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Влияние электромагнитных излучений сотовых телефонов на здоровье // Радиация и риск 2016. Т. 25. № 2. С. 43–56. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Vliyaniye elektromagnitnykh izlucheniye sotovykh telefonov na zdorov'e // Radiatsiya i risk 2016. V. 25. № 2. S. 43–56. (In Russian)]
2. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Количественные критерии микроволнового поражения. М.: ГЕОС, 2018. 232 с. [Zhavoronkov L.P., Petin V.G. Kolichestvennyye kriterii mikrovolnovogo porazheniya. M.: GEOS, 2018. 232 s. (In Russian)]
3. Григорьев Ю.Г., Бирюков А.П. Мобильная связь и здоровье населения: к оценке риска при техногенном электромагнитном загрязнении среды // Мед.

- радиология и радиац. безопасность. 2013. Т. 58. № 6. С. 44–61. [Grigor'ev Yu.G., Biryukov A.P. Mobil'naya svyaz' i zdorov'e naseleniya: k otsenke riska pri tekhnogennom elektromagnitnom zagryaznenii srede // Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost'. 2013. V. 58. № 6. S. 44–61. (In Russian)]
4. Hilert L., Berglind N., Arnetz B.B. Prevalence of self-reported hypersensitivity of electric or magnetic fields in a population-based questionnaire survey // Scand. J. Work. Environ. Health. 2002. V. 28. № 1. P. 33–41.
 5. Johansson O. Electrohypersensitivity: state-of-the-art of a functional impairment // Electromagn. Biol. Med. 2006. V. 25. № 4. P. 245–258.
 6. Ziskin M. Electromagnetic hypersensitivity – a COMAR Technical information Statement // IEEE Eng. Med. Biol. 2002. V. 21. № 5. P. 173–175.
 7. Hocking B. Preliminary report: symptoms associated with mobile phone use // Occup. Med. 1998. V. 48. № 6. P. 357–360.
 8. Muscat J., Malkin M. Thompson S., Shore R. et al. Handheld cellular telephones risk of brain cancer // JAMA. 2000. V. 284. № 23. P. 3001–3007.
 9. Hardell L., Hansson Mild K., Carlsberg M. Further aspects on cellular and cordless telephones and brain tumours // Int. J. Oncol. 2003. V. 22. № 2. P. 399–407.
 10. Lahkola A., Auvinen A., Raitanen J. et al. Mobile phone use and risk of glioma in 5 North European countries // Int. J. Cancer. 2007. V. 120. № 8. P. 1769–1775.
 11. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В. Психофизиологические показатели детей-пользователей мобильной связью. Сообщение 1. Современное состояние проблемы // Радиационная биология. Радиоэкология. 2011. Т. 51. № 5. С. 611–616. [Khorseva N.I., Grigor'ev Yu.G., Gorbunova N.V. Psychophysiological indicators for children using mobile phones. Communication. 1. Current state of the problem // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology. 2011. V. 51. № 5. P. 611–616. (In Russian)]
 12. Хорсева Н.И., Григорьев Ю.Г., Горбунова Н.В. Психофизиологические показатели детей-пользователей мобильной связью. Сообщение 2. Результаты четырехлетнего мониторинга // Радиационная биология. Радиоэкология. 2011. Т. 51. № 5. С. 617–623. [Khorseva N.I., Grigor'ev Yu.G., Gorbunova N.V. Psychophysiological indicators for children using mobile phones. Communication. 2. Results of four-year monitoring // Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya – Radiation Biology. Radioecology. 2011. V. 51. № 5. P. 617–623. (In Russian)]
 13. Thomas S., Heinrich S., von Kries R., Radon K. Exposure to radio-frequency electromagnetic fields and behavioral problems in Bavarian children and adolescents // Eur. J. Epidemiol. 2010. V. 25. № 2. P. 135–141.
 14. Измest'ева О.С. Биологические эффекты пролонгированного антенатального γ -облучения на фоне экспериментально индуцированных тиреопатий: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Обнинск: ГУ МРНЦ РАМН, 2000, 24 с. [Izmest'eva O.S. Biologicheskie efekty prolongirovannogo antenatal'nogo γ -oblucheniya na fone eksperimental'nogo induksirovannykh tireopatii: Avtoref. dis. ... kand. biol. nauk. Obninsk: GU MRNTs RAMN, 2000, 24 s. (In Russian)]
 15. Измest'ева О.С., Жаворонков Л.П., Семин Ю.А. и др. Экспериментальная оценка эмбриотоксического действия низкоинтенсивного ионизирующего излучения в разных периодах внутриутробного развития // Радиационная биология. Радиоэкология. 2012. Т. 52. № 1. С. 39–44. [Izmest'eva O.S., Zhavoronkov L.P., Semin Yu.A. i dr. Eksperimental'naya otsenka embriotoksicheskogo deystviya nizkointensivnogo ioniziruyushchego izlucheniya v raznykh periodakh vnutritrubnogo razvitiya // Radiats. biologiya. Radioekologiya. 2012. V. 52. № 1. S. 39–44. (In Russian)]
 16. Конописцев Л.А. Датирование сроков беременности у крыс и влияние яйцеклеток на количество живых плодов // Онтогенез. 1975. Т. 6. Вып. 4. С. 411–413. [Konopistsev L.A. Dativovanie srokov beremennosti u krys i vliyanie yaytsekletok na kolichestvo zhivykh plodov // Ontogenez. 1975. V. 6. Vyp. 4. S. 411–413. (In Russian)]
 17. Euroguide on the accommodation and care of animals used for experimental and other scientific purposes. London: FELASA, 2007.
 18. Руководство по экспериментальному (доклиническому) изучению новых фармакологических веществ / Под общей ред. чл.-корр. РАМН, проф. Р.У. Хабриева. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во “Медицина”, 2005. 832 с. [Rukovodstvo po eksperimental'nomu (doklinicheskomu) izucheniyu novykh farmakologicheskikh veshchestv / Pod obshchey redatsiyei chlena-korrespondenta RAMN, prof. R.U. Khabrieva. 2 izd., pererab. i dop. M.: Izd-vo “Meditsina”, 2005. 832 s. (In Russian)]
 19. Павлова Л.Н., Жаворонков Л.П., Дубовик Б.В. Влияние низкоинтенсивного широкополосного импульсно-модулированного электромагнитного поля на когнитивные функции мозга крыс // Радиация и риск. 2013. Т. 22. № 2. С. 91–100. [Pavlova L.N., Zhavoronkov L.P., Dubovik B.V. Vliyanie nizkointensivnogo shirokopolosnogo impul'sno-modulirovannogo elektromagnitnogo polya na kognitivnye funktsii mozga krys // Radiatsiya i risk. 2013. V. 22. № 2. S. 91–100. (In Russian)]
 20. DastAmooz S., Tahmasebi Boroujeni S., Shahbzi M., Vali Y. Physical activity as an option to reduce adverse effect of EMF exposure during pregnancy. // Int. J. Dev. Neurosci. 2018. № 71. P. 10–17.
 21. 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.
 22. Salford L., Nittby H., Brun A. et al. Non-thermal effects of EMF upon the mammalian brain: the Lund Experience // Environmentalist. 2007. V. 27. № 4. P. 493–500.
 23. Cjbb B., Jauchem O., Adair E. Radial arm maze performance of rats following repeated low level microwave radiation exposure // Bioelectromagnetics. 2004. V. 25. № 1. P. 49–57.
 24. Nittby H., Grafström G., Tian D.P. et al. Cognitive impairment in rats after long-term exposure to GSM-900 mobile Phone Radiation // Bioelectromagnetics. 2008. V. 29. № 3. P. 219–232.
 25. Fragopoulou A., Koussoulakos I., Margaritis L. Cranial and postcranial skeletal variations induced in mouse

- embryos by mobile phone radiation // *Pathophysiology*. 2010. V. 17. № 3. P. 169–177.
26. *Jin-hui Li, Da-peng Jiang, Ya-feng Wang et al.* Influence of electromagnetic pulse on the offspring sex ratio of male BALB/c mice // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* 2017. V. 54. P. 155–161.
27. *Yang M.J., Lang H.Y., Miao X. et al.* Effects of paternal electromagnetic pulse exposure on the reproductive endocrine function of male offspring: a pilot study // *Toxicol. Res. (Camb)*. 2018. V. 7. № 6. P. 1120–1127.
28. *Jiang D.P., Li J.H., Zhang J. et al.* Long-term electromagnetic pulse exposure induces Abeta deposition and cognitive dysfunction through oxidative stress and over-expression of APP and BACE1 // *Brain. Res.* 2016. V. 1. № 1642. P. 10–19.
29. *Bilgici B., Gun S., Avci B. et al.* What is adverse effect of wireless local area network, using 2.45 GHz, on the reproductive system? // *Int. J. Radiat. Biol.* 2018. V. 94. № 11. P. 1054–1061.

Experimental Evaluation of the Consequences of the Chronic Influence of Electromagnetic Radiation of the Mobile Communication Range in Antenatal Rat Development Period

O. S. Izmestieva^{a,#}, L. N. Pavlova^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: olgaizmestieva@mail.ru*

In the experiments on Wistar rats, the effects of chronic low-intensity microwave exposure to the cellular range (1–4 GHz) were evaluated in combination with multi-frequency pulse-modulated electromagnetic “noise” on the model of embryotoxic effects and analysis of postnatal development of irradiated offspring. It was shown that, in the absence of a visible pathology of pregnancy and childbirth, irradiated offspring in postnatal ontogenesis demonstrates deviations in the state of the central nervous system. Functional deficiency manifested itself in the form of emotional instability, a decrease in the motor component of an orienting-exploratory reaction and, as a result, a decrease in cognitive functions.

Keywords: electromagnetic radiation, cellular communication, antenatal period of development, somatic and psychophysiological development, functional imbalance