

Ю.Г. Григорьев<sup>1</sup>, Н.В. Чуешова<sup>2</sup>, Г.Г. Верещако<sup>2</sup>

## СОСТОЯНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КРЫС-САМЦОВ В РЯДУ ПОКОЛЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ОТ ОБЛУЧЕННЫХ РОДИТЕЛЕЙ И ПОДВЕРГНУТЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ОТ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА

1. Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И.Бурназяна ФМБА России, Москва.
2. Институт радиобиологии НАН Белоруссии, Гомель, Белоруссия. E-mail: natalya-chueshova@tut.by

Ю.Г. Григорьев – в.н.с., проф., д.м.н., зам. председателя Научного комитета по радиобиологии РАН, вице-президент Российского комитета по защите от неионизирующих излучений, член Консультативного комитета ВОЗ по международной программе «ЭМП и здоровье населения»; Н.В. Чуешова – н.с.; Г.Г. Верещако – к.б.н., в.н.с.

### Реферат

**Цель:** Изучить состояние репродуктивной системы крыс-самцов трех поколений ( $F_1$ – $F_3$ ), полученных от облученных родителей и подвергнутых ежедневной экспозиции от мобильного телефона (1745 МГц, 8 ч/сут) до достижения ими возраста 6 мес.

**Материал и методы:** Белых крыс в возрасте 52–54 сут подвергали электромагнитной экспозиции от мобильного телефона (1745 МГц, 8 ч/сут, ППЭ 0,2–20 мкВт/см<sup>2</sup>, среднее значение 7,5±0,3 мкВт/см<sup>2</sup>) на протяжении 90 сут. Далее облученных самцов и самок спаривали в соотношении 1:2. Самок на протяжении всего периода беременности (20–21 сут) и полученное от них потомство ( $F_1$ ) продолжали облучать при вышеуказанном режиме до достижения возраста 6 мес. В возрасте 4 мес животные 1-го поколения (самцы и самки) спаривались для получения потомства 2-го поколения, а от них таким же образом получали потомство 3-го поколения. Состояние репродуктивной системы крыс-самцов трех поколений оценивали в возрасте 2, 4 и 6 мес.

**Результаты:** Установлено, что рождаемость у облученных животных трех поколений достоверно падает и составляет от 8 самок в 1-м, 2-м и 3-м поколениях соответственно 53,6; 86,3 и 45,0 % от контроля. Электромагнитное воздействие оказывало влияние на массу семенников, эпидидимисов и семенных пузырьков крыс трех поколений преимущественно в возрасте 4 и 6 мес. Следует отметить повышение массы семенников у животных всех трех поколений в возрасте 4 мес и у животных 3-го поколения в возрасте 6 мес. Масса эпидидимисов в основном имеет тенденцию к увеличению у 4-месячных животных  $F_1$ – $F_3$ , однако в возрасте 6 мес у 1-го поколения животных выявляется его падение, которое коррелирует с уменьшением числа эпидидимальных сперматозоидов. Отмечается также снижение абсолютной и относительной массы семенных пузырьков у облученных животных трех поколений в возрасте 2 мес.

У экспонированных животных трех поколений в возрасте 4 и 6 мес выявляется дезинтеграция процесса сперматогенеза, которая преимущественно выражается в нарушении этапов трансформации сперматид. У крыс-самцов 1-го поколения в возрасте 2 и 6 мес обнаруживается падение числа эпидидимальных сперматозоидов, в то время как у облученных животных 2-го и 3-го поколений в возрасте 2 мес наблюдается выраженное повышение количества этих клеток, которое достигает 166,1 и 261,0 % по отношению к контролю. Отмечено снижение жизнеспособности сперматозоидов во всех возрастных группах (2, 4 и 6 мес), которое носит статистически значимый характер в возрасте 2 и 4 мес животных 1-го поколения. У 2-месячных животных 1–3-го поколений, а также у 4-месячных 2-го поколения установлено снижение концентрации тестостерона в сыворотке крови.

**Выводы:** Длительное влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения от мобильного телефона (1745 МГц, 8 ч/сут фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, ППЭ 0,2–20,0 мкВт/см<sup>2</sup>,  $\bar{x} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) на организм крыс самцов и самок, приводит к снижению рождаемости облученных животных, которое достигает 45 % в 3-м поколении. Выявлены значительные изменения исследуемых показателей репродуктивной системы крыс-самцов трех поколений, что выражается в снижении количества эпидидимальных сперматозоидов в 1-м поколении и стимуляции спермиогенеза во 2-м и 3-м поколении – раннее половое созревание, в падении их жизнеспособности и преимущественном снижении концентрации тестостерона в сыворотке крови.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, мобильные телефоны, крысы-самцы, репродуктивная система, рождаемость, масса органов, сперматогенез, эпидидимальные сперматозоиды, жизнеспособность, фрагментация ДНК (индекс DFI), тестостерон

Поступила: 25.01.2018. Принята к публикации: 05.09.2018

### Введение

За последние два десятилетия мобильные телефоны получили всеобщее распространение, превратившись в один из наиболее значимых постоянных источников электромагнитного воздействия на человека, которые, обладая высокой биологической активностью, создают определенную угрозу для его здоровья. При разговоре аппарат прикладывается непосредственно к височной области и наружному уху и его излучение достигает слухового нерва, захватывая сетчатку глаза. Вследствие этого, в зависимости от продолжительности экспозиции, у пользователей выявляются те или иные отклонения в функционировании ЦНС [1, 2]. По мнению авторов работ [3, 4], при частом использовании мобильного телефона существенно повышает-

ся риск развития опухолей височной доли головного мозга и мозговой оболочки. Имеются данные о негативном влиянии излучения мобильного телефона на состояние крови, показателей иммунной, репродуктивной систем и т.д. [5–7]. В ряде исследований особое внимание обращается на высокую чувствительность развивающегося организма к этому виду излучения и, в связи с этим, на необходимость принятия мер к ограничению использования мобильных телефонов детьми и подростками [8].

Растущая за последние годы частота мужского бесплодия предполагает существенное влияние негативных факторов окружающей среды на состояние репродуктивной системы [9, 10]. В связи с этим необходимо учитывать все более возрастающую нагрузку на человека за счет многих средств современных коммуни-

каций в дециметровом диапазоне электромагнитного излучения (ЭМИ), в том числе широко распространенных стандартов сотовой связи (900 и 1800 МГц) и облучения WiFi (2450 МГц).

Поэтому особого внимания требует изучение последствий воздействия электромагнитного излучения мобильного телефона на потомство в ряду поколений, не только родившиеся от экспонированных родителей, но и постоянно подвергающиеся такому же воздействию на протяжении последующей жизни. Имеющиеся данные по этой проблеме носят неоднозначный и противоречивый характер. В некоторых исследованиях отмечается отсутствие значимых эффектов как при внутриутробном облучении, так и у потомства нескольких поколений [11, 12], в других работах убедительно показано выраженные нарушения у животных, которые подвергались электромагнитному воздействию на протяжении нескольких поколений, вплоть до возникновения у них стерильности на определенном этапе [13, 14].

В связи с вышеизложенным, представляет интерес изучить последствия электромагнитного воздействия у животных, подвергнутых длительной экспозиции от мобильного телефона нетепловой интенсивности на протяжении трех поколений.

Цель настоящей работы – оценка эффективности электромагнитного воздействия мобильного телефона стандарта GSM (1745 МГц, ППЭ 0,2–20 мкВт/см<sup>2</sup>,  $\bar{x}_{\text{ППЭ}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) на воспроизводство животных, массу тела, органов репродуктивной системы и ее состояние у крыс-самцов трех поколений (F<sub>1</sub>–F<sub>3</sub>), которые были получены от облученных родителей и продолжали подвергаться экспозиции в период эмбриогенеза и постнатального развития до достижения возраста 6 мес.

### Материал и методы

Исследования проводили на белых крысах стандартного разведения, которых в возрасте 52–54 сут подвергали экспозиции ЭМИ от мобильного телефона (1745 МГц). Животных облучали ежедневно, 8 ч/сут, фракциями по 30 мин с интервалом 5 мин. Облучение осуществляли на протяжении 90 сут. Затем облученных самцов (4) и самок (8) спаривали в соотношении 1:2. От самок в дальнейшем получали потомство 1-го поколения. Крыс-самок на протяжении всего периода беременности (20–21 сут) и вплоть до отъема животных и их потомство продолжали облучать при вышеуказанном режиме до достижения возраста 6 мес. От животных 1-го поколения (самок и самцов) таким же образом получали потомство 2-го и 3-го поколений.

Электромагнитное воздействие на животных в диапазоне мобильной связи (1745 МГц) осуществляли с помощью экспериментальной установки, изготовленной в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники (г. Минск). Источником электромагнитного излучения (ЭМИ) являлся мобильный телефон (МТ) распространенной марки, подключенный к компьютеру с сервисной программой WinTesla, позволяющей управлять его рабо-

той. Условия облучения животных: несущая частота 1745 МГц в режиме имитации разговора, т.е. близкое по своим характеристикам к МТ, воздействию на пользователя стандарта GSM. Телефон размещался в центральной части рабочей зоны (1×0,7 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) в клетке измерялась прибором ПЗ-41 и находилась в пределах 0,2–20,0 мкВт/см<sup>2</sup>,  $\bar{x}_{\text{ППЭ}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup> (в зависимости от удаленности до антенны МТ).

У животных трех поколений в возрасте 1 мес определяли количество самцов и самок и массу их тела. При достижении крысами-самцами возраста 2, 4 и 6 мес их взвешивали и подвергали декапитации, выделяли семенники, эпидидимисы и семенные пузырьки, массу которых оценивали с последующим расчетом относительной массы выделенных органов. В суспензии тестикулярной ткани методом проточной цитофлуориметрии (цитофлуориметр Cytomics FC 500, Beckman Coulter, США) клеточные популяции сперматогенных клеток (по содержанию ДНК) были классифицированы как сперматогонии (2С), прелептотенные сперматоциты (сперматоциты в S-фазе), сперматоциты I порядка (4С), круглые (1С), удлиненные (НС1) и продолговатые сперматиды (НС2) [15].

В сыворотке крови измеряли концентрацию тестостерона иммуноферментным методом. Из эпидидимиса выделяли сперматозоиды, количество которых подсчитывали в камере Горяева [16], определяли их жизнеспособность [17], индекс DFI (фрагментация ДНК) [18].

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами биологической статистики, используя пакеты программ Excel и GraphPadPrism 5. При сравнении двух независимых групп по количественному признаку использовали критерий Манна–Уитни. Различия считали достоверными при  $p < 0,05$ .

### Результаты и обсуждение

Установлено, что рождаемость у облученных животных (при расчете от 8 самок) в трех поколениях падает и составляет 53,6; 86,3 и 45,0 % соответственно в 1–3-м поколениях. Количество родившихся крысят 1-го поколения в контроле от 8 самок составило 69, из них 31 самцов и 38 самок. От 8 облученных самок, которые спаривались с облученными самцами, получено 37 животных, в том числе 18 самцов и 19 самок. Однако в этом случае потомство дали только 6 самок, а от двух самок этой группы приплода не получено. Средняя численность помета на одну рожавшую самку в контрольной группе составляла  $8,6 \pm 0,8$ , в то время как в опытной – всего 6,2 ( $p < 0,05$ ), что по отношению к контролю составляло всего 71,5 % (табл. 1).

В поколении F<sub>2</sub> среднее количество крысят от одной экспонированной самки составляло  $8,6 \pm 0,6$  – рождаемость 86,3 %, а в третьем (F<sub>3</sub>) –  $7,5 \pm 0,6$  ( $p < 0,05$ ), т.е. в последнем случае, рождаемость по отношению к контролю от родивших самок составила 60,0 %.

Таблица 1

**Влияние электромагнитного излучения от мобильного телефона на репродуктивную функцию – распределения по полу и массе тела животных в ряду поколений F<sub>1</sub>–F<sub>3</sub>**

Группы животных	Число самок	Число родивших самок	Количество родившихся животных	Рождаемость, % к контролю (на 8 самок)	Среднее количество детенышей на самку	Рождаемость, % к контролю от родивших самок	Распределение по полу		Масса тела, г в возрасте 1 месяц	
							♂♂	♀♀	♂♂	♀♀
F <sub>1</sub>										
Контроль	8	8	69	100,0	8,6±0,8	100,0	31	38	70,5±2,1	66,6±1,3
ЭМИ	8	6	37	53,6	6,2±0,6*	71,5	18	19	74,3±2,1	70,5±2,4
F <sub>2</sub>										
Контроль	8	8	80	100,0	10,0±0,7	100,0	40	40	62,6±2,8	63,7±2,4
ЭМИ	8	8	69	86,3	8,6±0,6	86,3	38	31	67,5±2,1	61,4±2,7
F <sub>3</sub>										
Контроль	8	8	100	100,0	12,5±0,8	100,0	46	54	53,7±2,0	53,4±2,0
ЭМИ	8	6	45#	45,0	7,5±0,6*	60,0	18	18	71,1±3,9*	68,8±3,9*

Примечание: # – 9 детенышей умерло до месячного возраста; \* – достоверно при p < 0,05

Масса тела облученных самцов трех поколений в возрасте 1 мес имеет тенденцию к повышению по сравнению с контролем, в то время как у самок она выявлялась только у животных 1-го и 3-го поколений. Более значительное превышение массы тела экспериментальных животных, по сравнению с контрольными, наблюдается в третьем поколении и имеет статистически значимый характер для животных обоих полов.

Масса тела крыс-самцов трех поколений в возрасте 2, 4 и 6 мес также в основном превышает таковую у интактных животных соответствующего возраста, за исключением массы тела 2-месячных крыс поколений F<sub>2</sub> и F<sub>3</sub>.

Таким образом, низкоинтенсивное нетепловое электромагнитное облучение в пренатальном периоде оказывало негативное влияние на воспроизводство животных, вплоть до возникновения у некоторых из родителей (самцов и самок) стерильности, однако масса тела крыс-самцов в возрасте 1 мес превышала аналогичный показатель от контроля на 5,3 % в 1-м поколении до 32,4 % в 3-м поколении (p < 0,05).

Электромагнитное воздействие оказывало влияние на массу семенников и эпидидимисов крыс трех поколений преимущественно в возрасте 4 и 6 мес (табл. 2). Следует отметить повышение массы семенников у животных всех трех поколений в возрасте 4 мес и у животных 3-го поколения в возрасте 6 мес.

Таблица 2

**Влияние электромагнитного излучения от мобильного телефона на массу тела и органов репродуктивной системы крыс в ряду поколений F<sub>1</sub>–F<sub>3</sub> в возрасте 2, 4 и 6 мес**

Массовые показатели	F <sub>1</sub>		F <sub>2</sub>		F <sub>3</sub>	
	Контроль	ЭМИ	Контроль	ЭМИ	Контроль	ЭМИ
Возраст животных 2 мес						
Масса тела	206,7±7,9	197,8±5,4	218,2±14,0	198,5±8,0	196,4±7,6	201,4±16,6
АМС, г	1,28±0,05	1,24±0,04	1,30±0,07	1,21±0,06	1,17±0,08	1,26±0,10
ОМС, %	0,62±0,02	0,626±0,009	0,60±0,04	0,61±0,01	0,59±0,03	0,63±0,03
АМЭ, г	0,22±0,01	0,20±0,002	0,205±0,020	0,176±0,015	0,18±0,01	0,20±0,01
ОМЭ, %	0,108±0,003	0,101±0,003	0,095±0,008	0,088±0,006	0,10±0,01	0,098±0,004
АМСП, г	0,48±0,03	0,35±0,04*	0,322±0,052	0,295±0,070	0,33±0,05	0,28±0,06
ОМСП, %	0,23±0,01	0,17±0,02*	0,15±0,03	0,146±0,028	0,17±0,02	0,13±0,02
Возраст животных 4 мес						
Масса тела	318,7±8,9	325,3±7,2	342,7±7,8	366,5±14,6	339,0±11,8	356,8±29,0
АМС, г	1,44±0,02	1,57±0,03*	1,49±0,03	1,71±0,03*	1,34±0,06	1,50±0,07
ОМС, %	0,45±0,01	0,48±0,01	0,44±0,01	0,47±0,02	0,40±0,01	0,42±0,01
АМЭ, г	0,46±0,01	0,50±0,01*	0,46±0,01	0,50±0,01*	0,43±0,02	0,48±0,02
ОМЭ, %	0,15±0,01	0,15±0,001	0,13±0,003	0,14±0,01	0,13±0,003	0,14±0,01
АМСП, г	0,98±0,12	1,08±0,05	1,25±0,06	1,23±0,06	1,21±0,09	1,19±0,09
ОМСП, %	0,31±0,05	0,34±0,01	0,37±0,02	0,34±0,01	0,36±0,03	0,34±0,04
Возраст животных 6 мес						
Масса тела	406,0±9,73	408,8±11,3	386,4±11,3	394,0±10,5	377,4±13,3	406,0±20,6
АМС, г	1,66±0,032	1,56±0,09	1,59±0,06	1,62±0,07	1,44±0,05	1,65±0,06*
ОМС, %	0,41±0,02	0,39±0,03	0,41±0,01	0,41±0,01	0,38±0,02	0,41±0,01
АМЭ, г	0,54±0,01	0,49±0,02*	0,54±0,02	0,51±0,02	0,48±0,02	0,53±0,01*
ОМЭ, %	0,13±0,003	0,12±0,01	0,14±0,001	0,13±0,003*	0,13±0,004	0,13±0,004
АМСП, г	1,39±0,08	1,43±0,07	1,26±0,05	1,34±0,03	1,01±0,12	1,21±0,08
ОМСП, %	0,34±0,02	0,37±0,02	0,33±0,01	0,34±0,003	0,26±0,02	0,30±0,02

Примечание: АМС, АМЭ и АМСП – абсолютная масса семенников, эпидидимисов и семенных пузырьков; ОМС, ОМЭ и ОМСП – относительная масса семенников, эпидидимисов и семенных пузырьков; \* – достоверно при p < 0,05

Масса эпидидимисов в основном имеет тенденцию к увеличению у 4-месячных животных  $F_1$ – $F_3$ , однако в возрасте 6 мес у 1-го поколения животных выявляется его падение, которое коррелирует с уменьшением числа эпидидимальных сперматозоидов. Следует также отметить падение абсолютной и относительной массы семенных пузырьков у облученных животных 2-месячного возраста трех поколений, имеющее достоверный характер в поколении  $F_1$ .

Количество сперматогенных клеток различных популяций экспериментальных крыс-самцов в возрасте 2 мес 1-го поколения несущественно отличается от контрольных значений, за исключением тенденции к повышению числа продолговатых сперматид (табл. 3). Однако в возрасте 4 мес наблюдаются статистически значимое снижение количества прелептотенных сперматоцитов и удлинённых сперматид и повышение количества сперматоцитов 1-го порядка, в то время как у 6-месячных крыс выявляется падение числа сперматогоний (–14,5 %), удлинённых сперматид (–22,7 %) и заметный рост округлых сперматид (+28,7 %). Следовательно, можно заключить, что диспропорция клеточного состава популяций сперматогенных клеток, прежде всего, затрагивает конечный этап сперматогенеза – трансформацию сперматид.

У экспонированных крыс-самцов 2-го и 3-го поколений количественный состав сперматогенных клеток различных этапов дифференцировки в возрасте 2 мес, так же как и в 1-ом поколении, изменяется несущественно, а в возрасте 4 и 6 мес имеются заметные нарушения отдельных этапов дифференцировки исследуемых клеток. Наиболее значительные отклонения от контрольных значений выявляются у 2-го поколения, имеющие разнонаправленный характер в возрасте

4 мес и 6 мес на стадиях трансформации сперматид, а у 3-го поколения в возрасте 4 мес отмечается достоверное повышение количества сперматоцитов 1-го порядка и падение числа удлинённых сперматид, в то время как в возрасте 6 мес выявляется заметное снижение перелептотенных сперматоцитов и также удлинённых сперматид ( $p < 0,05$ ).

При анализе продукции сперматогенеза у облученных животных по количеству сперматозоидов, выделенных из эпидидимиса, отмечается достоверное снижение их числа у животных 2- и 6-месячного возраста 1-го поколения, более значительное для первых (рис. 1а). Напротив, у животных 2-го и 3-го поколений, подвергнутых постоянному электромагнитному воздействию излучения от мобильного телефона, в этом же возрасте наблюдается выраженное повышение количества зрелых половых клеток (соответственно в 1,66 и 2,67 раза по сравнению с контролем). В то же время их число у 1–3 поколений в возрасте 4 и 6 мес несущественно отличалось от таковых в контрольной группе за исключением их некоторого уменьшения у животных 1-го поколения в возрасте 6 мес.

Жизнеспособность эпидидимальных сперматозоидов у экспонированных крыс-самцов трех исследуемых поколений практически снижается во всех возрастных группах (2, 4 и 6 мес), однако она носит статистически значимый характер в возрасте 2 мес, а также у животных 1-го поколения в возрасте 4 мес (81,7 % к контролю) (рис. 1б).

Данные о фрагментации ДНК в сперматозоидах облученных животных (индекс DFI) показывают в основном отсутствие существенных отклонений этого показателя от контрольного уровня, что вероятно указывает на недостаточную поглощенную энергию

Таблица 3

**Влияние электромагнитного излучения от мобильного телефона на количественный состав сперматогенных клеток в тестикулярной ткани крыс в ряду поколений  $F_1$ – $F_3$  в возрасте 2, 4 и 6 мес, %**

Сперматогенные клетки	$F_1$		$F_2$		$F_3$	
	Контроль	ЭМИ	Контроль	ЭМИ	Контроль	ЭМИ
Возраст животных 2 мес						
2С	13,73±0,84	14,04±0,62	8,37±0,51	7,80±0,10	10,78±0,55	9,85±1,06
S-phasa	3,87±0,13	3,71±0,30	2,60±0,31	2,65±0,09	5,05±0,49	3,78±0,46
4С	8,69±0,35	8,18±0,25	5,83±0,56	5,66±0,64	7,89±1,38	6,51±1,48
1С	56,82±0,67	55,30±0,63	39,28±1,14	41,00±0,77	39,68±1,01	40,47±0,96
HC1	13,07±0,71	14,03±0,89	15,88±1,35	13,32±0,68	17,18±1,87	17,19±1,88
HC2	3,03±0,25	3,76±0,52	27,60±2,83	29,20±1,51	18,42±1,22	21,69±2,39
Возраст животных 4 мес						
2С	9,85±0,27	9,59±0,45	6,55±0,17	6,81±0,11	6,35±0,54	6,58±0,13
S-phasa	3,61±0,07	3,34±0,10*	1,95±0,17	2,07±0,09	2,47±0,09	2,46±0,05
4С	5,28±0,46	6,65±0,43*	2,98±0,26	3,27±0,53	3,81±0,34	5,17±0,45*
1С	44,17±1,04	46,77±1,07	32,14±1,52	33,12±0,54	33,81±1,49	35,69±1,16
HC1	23,66±1,01	19,61±1,21*	21,10±1,73	14,63±1,41*	27,56±1,84	21,05±1,05*
HC2	13,59±0,54	13,15±1,25	34,74±0,65	39,84±1,16*	25,27±2,11	27,11±1,22
Возраст животных 6 мес						
2С	8,29±0,32	7,08±0,44*	8,32±0,35	8,96±0,30	8,22±0,36	7,84±0,59
S-phasa	1,96±0,08	1,91±0,11	2,30±0,19	2,64±0,06	2,49±0,17	1,89±0,17*
4С	4,42±0,19	4,59±0,26	6,55±0,37	6,39±0,16	5,16±0,41	4,85±0,13
1С	26,39±1,28	33,95±1,08*	35,02±1,63	41,36±0,98*	40,12±0,99	36,35±2,67
HC1	30,99±1,41	23,96±2,90*	15,67±1,31	15,45±1,11	15,12±0,44	13,03±0,67*
HC2	26,86±1,51	27,91±2,17	31,45±1,60	24,89±1,24*	28,50±0,56	35,51±3,85

Примечание: 2С – сперматогонии; S-phasa – сперматоциты в прелептотене; 4С – сперматоциты I порядка, 1С, HC1 и HC2 – круглые, удлинённые и продолговатые сперматиды; \* – достоверно при  $p < 0,05$

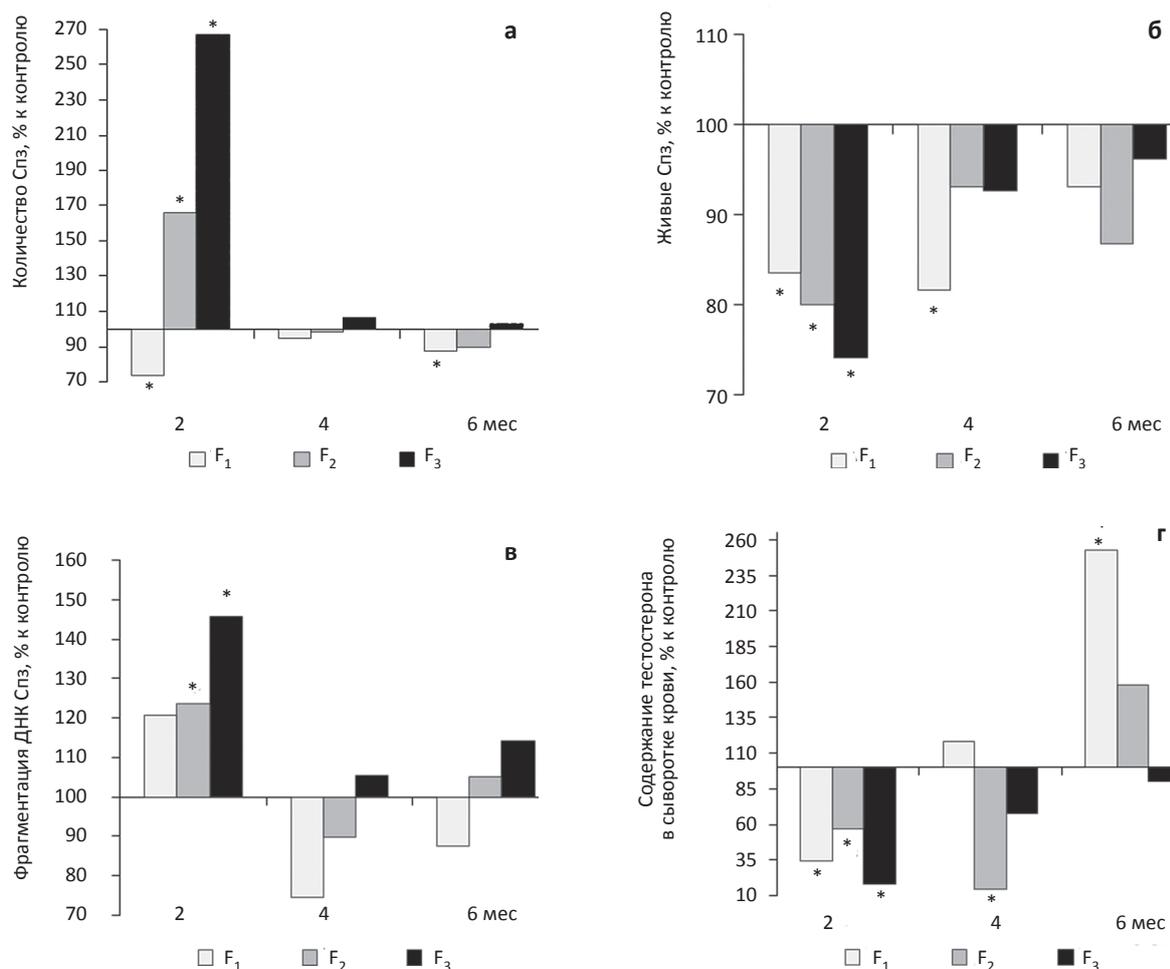


Рис. Влияние электромагнитного излучения от мобильного телефона на количество (а), жизнеспособность (б), фрагментацию ДНК (индекс DFI) (в) эпидидимальных сперматозоидов (Спз) и концентрацию тестостерона в сыворотке крови (г) самцов-крыс в ряду поколений F<sub>1</sub>-F<sub>3</sub> в возрасте 2, 4 и 6 мес

ЭМИ, чтобы вызвать нарушения в структуре ДНК в этих клетках. Тем не менее, у 2-месячных животных 2-го и 3-го поколений выявляется достоверное повышение индекса DFI на 23,6 и 45,9 %. Кроме того, следует отметить, что его значение как у контрольных, так и у экспериментальных животных указывает на определенный спонтанный уровень фрагментации ДНК в сперматозоидах, который, по-видимому, вызван влиянием различных внешних и внутренних факторов (рис. 1в).

Выявлено статистически значимое снижение концентрации тестостерона в сыворотке крови у экспонированных животных в возрасте 2 мес у 1–3-го поколений и у 4-месячных второго поколения на 65,8, 43,6, 82,8 и 93,4 % по сравнению с группой необлученных животных (рис. 1г). Данное снижение андрогенного статуса, по-видимому, связано с нарушением гормон-секретирующей функцией клеток Лейдига, что подтверждается в работе M. Sayginetal et al (2011), которые зафиксировали снижение количества клеток Лейдига у самцов крыс после 28-дневной экспозиции ЭМИ с частотой 2,45 ГГц [19].

Тем не менее, необходимо отметить статистически значимое увеличение содержания тестостерона у животных 1-го поколения в возрасте 6 мес на 152,82 %,

что говорит о потенцировании процессов в гипоталамо-гипофизарной системе.

В ряде исследований, посвященных изучению воздействия электромагнитной экспозиции дециметрового диапазона на потомство, выявляются сокращение общей численности потомства и их выживаемости, возникновение стерильности и различные нарушения репродуктивной функции [13, 14, 20, 21].

Анализ популяции белых аистов (*Ciconia ciconia*), расположенных вблизи ЭМП базовых станций сотовых телефонов (900–1800 МГц) показал, что общая продуктивность гнезд на расстоянии 200 м от антенны была 0,86±0,16. Этот же показатель на расстоянии более чем на 300 м практически удваивается, составляя в среднем 1,60±0,14. В местах гнездования, расположенных на расстоянии 100 м от антенны, погибло много птенцов. Полученные данные объективно указывают на вероятность того, что ЭМИ наносит ущерб репродукции птиц [22].

Пренатальное облучение крыс Sprague-Dawley (900 МГц, ППЭ 0,265 Вт/м<sup>2</sup>, 1 ч/сут на протяжении 13–21 сут беременности) вызывало у 21-дневных родившихся животных нарушения структуры ткани семенника по сравнению с контролем. Диаметр извитых семенных канальцев и толщина сперматогенного эпителия

существенно снижались. Интенсивность апоптоза и нарушения структуры ДНК значительно повышаются у животных в облученной группе, при отсутствии различий в массе семенников [23]. У крыс-самцов 1-го поколения, полученного от облученных родителей при 897 МГц (8 ч/сут), выявляется значительное снижение жизнеспособности эпидидимальных сперматозоидов [24].

Необходимо также отметить, что в некоторых исследованиях негативных эффектов у крыс-самцов, которые подвергались пренатальному облучению или электромагнитному воздействию в диапазоне мобильной связи либо от оборудования WiFi, в ряду поколений не было обнаружено [11, 12, 25, 26]. Во многих случаях это, вероятно, обусловлено кратковременностью экспозиции животных.

Таким образом, анализ литературы и полученные данные свидетельствуют о том, что длительное электромагнитное облучение от мобильного телефона стандарта GSM нетепловой интенсивности на крыс-самцов трех поколений ( $F_1$ – $F_3$ ), которые были получены от облученных родителей, приводит к значительному падению рождаемости облученных самок и нарушениям, возникающим в отдельных звеньях репродуктивной системы крыс-самцов в возрасте 2, 4 и 6 мес. В большей степени они проявляются в диспропорции клеточного состава на заключительном этапе сперматогенеза (сперматиды различных этапов трансформации) а также на снижении количества эпидидимальных сперматозоидов их жизнеспособности и повышении частоты программированной гибели клеток. Следовательно, длительная электромагнитная низкоинтенсивная (нетепловая) экспозиция от мобильного телефона значительно повышает риск неблагоприятного воздействия на репродуктивную систему самцов в период его пренатального и постнатального развития.

## Выводы

1. Установлено, что длительная электромагнитная экспозиция (1745 МГц, 8 ч/сут при ППЭ 0,2–20 мкВт/см<sup>2</sup>,  $\bar{x}_{\text{ППЭ}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) приводит к существенному падению рождаемости животных по сравнению с таковым у контроля. Рождаемость у облученных самок (при расчете от 8 животных) в трех поколениях составляет в 1–3-м поколениях соответственно 53,6; 86,3 и 45,0 %.

2. Показано, что длительное излучение мобильного телефона стандарта GSM оказывает существенное влияние на заключительный этап процесса сперматогенеза, вызывая значительные диспропорции количества сперматид различных типов у крыс самцов  $F_1$ – $F_3$  в возрасте 2, 4 и 6 мес.

3. У облученных самцов трех поколений в возрасте 2, 4 и 6 мес выявляются значительные изменения количества эпидидимальных сперматозоидов, жизнеспособность которых преимущественно падает, а также наблюдается снижение концентрации тестостерона в сыворотке крови.

4. Длительная электромагнитная экспозиция от мобильного телефона неблагоприятно влияет на репродуктивную систему самцов в ряду поколений при пренатальном и постнатальном развитии организма.

5. Полученные данные подтверждают высокую эффективность длительного электромагнитного воздействия низкой интенсивности (нетепловое действие) от мобильного телефона на состояние репродуктивной системы крыс-самцов трех поколений, полученных от облученных родителей.

6. Суммируя результаты представленных исследований, считаем возможным заключить, что развивающаяся репродуктивная система самцов является одной из наиболее чувствительных систем организма при действии электромагнитного излучения в диапазоне мобильной связи, наряду с когнитивными функциями и высоким риском возникновения опухолей мозга в облученном организме.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности. – М.: Экономика. 2016. 574 с.
2. Salford L.G., Brun A.E., Eberhardt J.L. et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones // *Environ. Health Perspect.* 2003. Vol. 111. P. 881–883. DOI: 10.1289/ehp.6039.
3. Hardell L., Carlberg M. Mobile phones, cordless phones and the risk of brain tumours // *Int. J. Oncol.* 2009. Vol. 35. № 1. P. 5–17. DOI: 10.1093/ije/dyq079.
4. Cardis E., Deltour I., Vrijheid M. et al. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study // *Int. J. Epidemiol.* 2010. Vol. 39. № 3. P. 675–694.
5. Якименко И.Л., Сидорик Е.П., Цибулин О.С. Метаболические изменения в клетках при действии электромагнитного облучения систем мобильной связи // *Укр. біохім. журн.* 2011. Т. 83. № 2. С. 20–28.
6. Пряхин Е.А. Адаптационные реакции на субклеточном, клеточном, системном и организменном уровнях при воздействии электромагнитных полей. – Челябинск. Автореф. дисс. докт. биол. наук. 2007. 51 с.
7. Григорьев Ю.Г. Электромагнитные поля сотовых телефонов и здоровье детей и подростков (Ситуация, требующая принятия неотложных мер) // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2005. Т. 45. № 4. С. 442–450.
8. Верещако Г.Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние мужской репродуктивной системы и потомство. – Минск: Беларуская навука. 2015. 186 с.
9. Галимова Э.Ф., Фархутдинов Р.Р., Галимов Ш.Н. Влияние экстремальных факторов на мужскую репродуктивную систему // *Пробл. репродукции.* 2010. № 4. С. 60–66.
10. Николаев А.А., Логинов П.В. Показатели сперматогенеза мужчин, подверженных воздействию неблагоприятных условий среды // *Урология.* 2015. № 5. С. 60–65.
11. Gathiram, P., Kistnasamy B., Lalloo U. Effects of a unique electromagnetic field system on the fertility of rats // *Arch. Environ. Occup. Health.* 2009. Vol. 64. № 2. P. 93–100.
12. Sommer A.M., Grote K., Reinhardt T. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study // *Radiat. Res.* 2009. Vol. 171. № 1. P. 89–95. DOI: 10.1667/RR1460.1.
13. Magras I.N., Xenos T.D. RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice // *Bioelectromagnetics.* 1997. Vol. 18. P. 455–461.

14. Шибкова Д.З., Шилкова Т.В., Овчинникова А.В. Ранние и отдаленные эффекты влияния электромагнитного поля радиочастотного диапазона на репродуктивную функцию и морфофункциональное состояние потомства экспериментальных животных // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 5. С. 514.
  15. Suresh R., Aravindan G.R., Moudgal N.R. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: Comparative study among six species of mammals // J. Biosci. 1992. Vol. 17. № 4. P. 413–419.
  16. Евдокимов В.В., Коденцова В.М., Вржесинская О.А. и соавт. Влияние радиационного облучения на витаминный статус и сперматогенез крыс // Бюл. эксп. биол. и мед. 1997. Т. 123. № 5. С. 524–527.
  17. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen – 5th ed. Geneva: WHO. 2010. 271 pp.
  18. Evenson D.P., Larson K.L., Jost L.K. Sperm chromatin structure assay: its clinical use for detecting sperm DNA fragmentation in male infertility and comparisons with other techniques // Andrology. 2002. Vol. 23. № 1. P. 25–43.
  19. Saygin M., Caliskan S., Karahan N. et al. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field // Toxicol. Ind. Health. 2011. Vol. 27. № 5. P. 455–463. DOI: 10.1177/0748233710389851.
  20. Kesari K.K., Behari J. Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS // Electromagn. Biol. Med. 2012. Vol. 31. № 3. P. 213–222. DOI: 10.3109/15368378.2012.700292.
  21. Ma H.R., Li Y.Y., Luo Y.P. et al. Effect of Guilingji capsule on the fertility, liver functions, and serum LDH of male SD rats exposed by 900 MHz cell phone // Zhong Guo Zhong Xi Yi Jie He, Za Zhi. 2014. Vol. 34. № 4. P. 475–479.
  22. Balmori A. Possible effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*) // Electromagn. Biol. Med. 2005. Vol. 24. P. 109–119. DOI: 10.1080/15368370500205472.
  23. Ханси Н., Одаци Е., Кая Н. The effect of prenatal exposure to 900 MHz electromagnetic field on the 21-old-day rat testicle // Reprod. Toxicol. 2013. Vol. 42. P. 203–209. DOI: 10.1016/j.reprotox.2013.09.006.
  24. Верещако Г.Г., Чуешова Н.В., Горох Г.А., Наумов А.Д. Состояние репродуктивной системы крыс-самцов 1-го поколения, полученных от облученных родителей и подвергнутых воздействию ЭМИ (897 МГц) в период эмбриогенеза и постнатального развития // Радиационная биология. Радиоэкология. 2014. Т. 54. № 2. С. 186–192.
  25. Takahashi S., Imai N., Nabae K. et al. Lack of adverse effects of whole-body exposure to a mobile telecommunication electromagnetic field on the rat fetus // Radiat. Res. 2010. Vol. 173. № 3. P. 62–72. DOI: 10.1667/RR1615.1.
  26. Pouletier de Gannes F., Haro E., Hurtier A. et al. Effect of *in utero* Wi-Fi exposure on the pre- and postnatal development of rats // Birth Defects Res. B. Dev. Reprod. Toxicol. 2012. Vol. 95. № 2. P. 130–136. DOI: 10.1002/bdrb.20346.
- Для цитирования:** Григорьев Ю.Г., Чуешова Н.В., Верещако Г.Г. Состояние репродуктивной системы крыс-самцов в ряду поколений, полученных от облученных родителей и подвергнутых электромагнитному воздействию от мобильного телефона // Мед. радиология и радиационная безопасность. 2018. Т. 63. № 5. С. 33–40.  
DOI: 10.12737/article\_5bc89628800007.23290426

## Reproductive System State among Generations of Male Rats, Obtained from Irradiated Parents and Subjected to Electromagnetic Interference from Mobile Phone (1745 MHz)

Yu.G. Grigoriev<sup>1</sup>, N.V. Chueshova<sup>2</sup>, G.G. Vereschako<sup>2</sup>

1. A.I. Burnasyan Federal Medical and Biophysical Centre, Moscow, Russian Federation;  
2. Institute of Radiobiology of NAS of Belarus, Gomel, Belarus. E-mail: natalya-chueshova@tut.by

Yu.G. Grigoriev – Leading Researcher, Dr. Sc. Med., Prof., Deputy Chairman of the Scientific Council on Radiobiology of RAS, Vice-President of the Russian National Committee on Protection from Non-Ionizing Radiation, Member of the WHO Advisory Committee on the International Program “EMF and Public Health”; N.V. Chueshova – Researcher; G.G. Vereschako – Leading Researcher, PhD Biol.

### Abstract

**Purpose:** To study the condition of the reproductive system of the male rats at three generations ( $F_1$ – $F_3$ ) received from irradiated parents and who were exposed daily to the mobile phone (1745 MHz, 8 hours/day) until reaching the age of 6 months.

**Material and methods:** The white rats aged 52–54 days were subjected to electromagnetic exposure from the mobile phone (1745 MHz, 8 hours/day, power density 0.2–20  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,  $\bar{x} = 7.5 \pm 0.3 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) for 90 days. The irradiated males and females were then mated in a 1:2 ratio. The females throughout the gestation period (20–21 days) and the offspring ( $F_1$ ) obtained from them continued to be irradiated under the above-mentioned regimen until reaching the age of 6 months. The animals of the 1st generation (males and females) at the age of 4 months mated for the generation of the second generation, and from them in the same way received the offspring of the third generation. The state of the reproductive system of male rats of 3 generations was evaluated at the age of 2, 4 and 6 months.

**Results:** It is established that birth rate at the irradiated animals of three generations authentically falls. This posterity from 8 females makes 53, 86 and 45 % respectively in the 1st, 2nd and 3rd generation of the control group.

The electromagnetic effect affected the weight of the testicles and epididymis of rats of three generations, mainly at the age of 4 and 6 months. The mass of testicles increased at animals of the 3 generation at the age of 4 months and at animals of the 3rd generation at the age of 6 months. The mass of epididymis generally increases at animals of 4 months of the  $F_1$ – $F_3$ , but at the age of 6 months in the 1st generation falls, and correlates with a decrease in the number of epididymal spermatozoa. There is also a decrease in the absolute and relative mass of seminal vesicles in irradiated animals of three generations at the age of 2 months.

At exposed animals of 3 generations of 2 months there are no significant deviations in the process of spermatogenesis, however at the age of 4 and 6 months there are significant violations of the number of spermatids of different types. In male rats of the 1st

generation at the age of 2 and 6 months exposed to EMP in the prenatal and postnatal periods and obtained from irradiated parents, a drop in the number of epididymal spermatozoa is observed, while in the irradiated animals of the 2nd and 3rd generation at the age of 2 months, there is a marked increase in the number of these cells. Their viability is reduced in all age groups (2, 4 and 6 months), which is statistically significant at the age of 2 and 4 months of animals of the 1st generation. In male rats of 1–3 generations at the age of 2 months and in 4 months 2nd generation, there was a significant decreased the concentration of testosterone in the blood serum by 65.8, 43.6, 82.8 and 93.4 %, respectively.

**Conclusions:** The long-term effect of low-intensity electromagnetic radiation from the mobile phone on the body of rats of males and females, leads to a decrease in the birth rate of irradiated animals, which reaches 45 % in the third generation. Significant changes in the studied indicators of the reproductive system of male rats of three generations are revealed, which is reflected in a decrease in the number of epididymal spermatozoa in the 1st generation and in a significant increase in the 2nd and 3rd generation – early puberty, in the fall of their viability and the predominant decrease in the concentration of testosterone in the blood serum.

**Key words:** *electromagnetic radiation, mobile phones, male rats, reproductive system, birth rate, organ weight, spermatogenesis, epididymal spermatozoa, viability, fragmentation of DNA (index DFI), testosterone*

## REFERENCES

1. Grigoriev YuG, Grigoriev OA. Cellular communication and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard prediction. Moscow: Ekonomiks; 2016. 574 p. Russian.
2. Salford LG, Brun AE, Eberhardt JL, et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect.* 2003;111:881-3. DOI: 10.1289/ehp.6039.
3. Hardell L, Carlberg M. Mobile phones, cordless phones and the risk of brain tumours. *Int J Oncol.* 2009;35(1):5-17. DOI: 10.1093/ije/dyq079.
4. Cardis E, Deltour I, Vrijheid M, et al. Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study. *Int J Epidemiol.* 2010; 39(3):675-94.
5. Jakimenko IL, Sidorik EP, Cibulin OS. Metabolic changes in cells under the action of electromagnetic irradiation of mobile communication systems. *Ukrainskij biokhimijskij zhurnal.* 2011;83(2):20-8. Russian.
6. Priakhin EA. Adaptive reactions at subcellular, cellular, systemic and organismal levels under the influence of electromagnetic fields. Cheliabinsk: Avtoref. diss. 2007. 51 p. Russian.
7. Grigoriev YuG. Electromagnetic fields of cell phones and health of children and adolescents (Situation requiring urgent measures). *Radiation biology. Radioecology.* 2005;45(4):442-50. Russian.
8. Vereshhako GG. Influence of electromagnetic radiation of mobile phones on the state of male reproductive system and offspring. Minsk: Belaruskaya navuka; 2015. 186 p. Russian.
9. Galimova JeF, Farhutdinov RR, Galimov ShN. The influence of extreme factors on the male reproductive system. *Problemy reprodukci.* 2010;(4):60-6. Russian.
10. Nikolaev AA, Loginov PV. Indicators of spermatogenesis of men exposed to adverse environmental conditions. *Urologija.* 2015;(5):60-5. Russian.
11. Gathiram P, Kistnasamy B, Lalloo U. Effects of a unique electromagnetic field system on the fertility of rats. *Arch Environ Occup Health.* 2009;64(2):93-100.
12. Sommer AM, Grote K, Reinhardt T, et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields (UMTS) on reproduction and development of mice: a multi-generation study. *Radiat Res.* 2009;171(1):89-95. DOI: 10.1667/RR1460.1.
13. Magras IN, Xenos TD. RF radiation-induced changes in the prenatal development of mice. *Bioelectromagnetics.* 1997;18:455-61.
14. Shibkova DZ, Shilkova TV, Ovchinnikova AV. Early and long-term effects of radio-frequency electromagnetic field influence on reproductive function and morphofunctional state of offspring of experimental animals. *Radiation biology. Radioecology.* 2015; 55(5):514. Russian.
15. Suresh R, Aravindan GR, Moudgal NR. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: Comparative study among six species of mammals. *J. Biosci.* 1992;17(4):413-19.
16. Evdokimov VV, Kodentsova VM, Vrzhesinskaja OA, et al. Influence of radiation exposure on vitamin status and spermatogenesis of rats. *Bulletin of experimental biology and medicine.* 1997;123(5):524-7. Russian.
17. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen – 5th ed. Geneva: WHO; 2010. 271 p.
18. Evenson DP, Larson KL, Jost LK. Sperm chromatin structure assay: its clinical use for detecting sperm DNA fragmentation in male infertility and comparisons with other techniques. *Andrology.* 2002;23(1):25-43.
19. Saygin M, Caliskan S, Karahan N, et al. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field. *Toxicol. Ind. Health.* 2011;27(5):455-63. DOI: 10.1177/0748233710389851.
20. Kesari KK, Behari J. Evidence for mobile phone radiation exposure effects on reproductive pattern of male rats: role of ROS. *Electromagn Biol Med.* 2012;31(3):213-22. DOI: 10.3109/15368378.2012.700292.
21. Ma HR, Li YY, Luo YP, et al. Effect of Guilingji capsule on the fertility, liver functions, and serum LDH of male SD rats exposed by 900 MHz cell phone. *Zhongguo Zhong Xi Yi Jie He Za Zhi.* 2014;34(4):475-9.
22. Balmori A. Possible Effects of electromagnetic fields from phone masts on a population of white stork (*Ciconia ciconia*). *Electromagn Biol Med.* 2005;24:109-19. DOI: 10.1080/15368370500205472.
23. Hanci H, Odaci E, Kaya H. The effect of prenatal exposure to 900-MHz electromagnetic field on the 21-old-day rat testicle. *Reprod Toxicol.* 2013; 42:203-9. DOI: 10.1016/j.reprotox.2013.09.006.
24. Vereshchako GG, Chueshova NV, Gorokh GA, Naumov AD. State of reproductive system of male rats of the 1st generation received from irradiated parents and exposed to EMR (897 MHz) during embryogenesis and postnatal development. *Radiation biology. Radioecology.* 2014;54(2):186-92. Russian.
25. Takahashi S, Imai N, Nabae K, et al. Lack of adverse effects of whole-body exposure to a mobile telecommunication electromagnetic field on the rat fetus. *Radiat Res.* 2010;173(3):62-72. DOI: 10.1667/RR1615.1.
26. Poullietier de Gannes F, Haro E, Hurtier A, et al. Effect of *in utero* Wi-Fi exposure on the pre- and postnatal development of rats. *Birth Defects Res. B. Dev. Reprod Toxicol.* 2012;95(2):130-6. DOI: 10.1002/bdrb.20346.

**For citation:** Grigoriev YuG, Chueshova NV, Vereschako GG. Reproductive System State among Generations of Male Rats, Obtained from Irradiated Parents and Subjected to Electromagnetic Interference from Mobile Phone. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2018;63(5):33-40. Russian.

DOI: 10.12737/article\_5bc89628800007.23290426