

ISSN 1561-8323 (Print)

ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 614.875:537.872:52-77+599.323.4+591.3:591.463.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

Поступило в редакцию 25.02.2019

Received 25.02.2019

**Н. В. Чуешова<sup>1</sup>, член-корреспондент Ф. И. Висмонт<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь***ВЛИЯНИЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЧАСТОТЫ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА НА МОРФОФУНКЦИОНАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КРЫС-САМЦОВ И ИХ ПОТОМСТВА**

**Аннотация.** В эксперименте были установлены отдаленные последствия влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения от мобильного телефона (ЭМИ МТ 1745 МГц,  $\bar{x}_{\text{пд}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) в потомстве крыс-самцов, рожденных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию исследуемого фактора. Установлено изменение соотношения полов у рожденного потомства и снижение их массы тела. Анализ состояния репродуктивной системы потомства самцов при достижении ими возраста 2 и 4 месяца выявил значительные нарушения, причем наиболее выраженные изменения отмечены у потомства, полученного от обоих облученных родителей или когда облучался только самец. Данные изменения проявляются в нарушении нормального функционирования сперматогенного эпителия, а именно имела место интенсификация начального этапа сперматогенеза при значительном его угнетении на стадии трансформации сперматид. Установлено снижение количества зрелых половых клеток – сперматозоидов и выраженное ухудшение их жизнеспособности, а также усиление секреции тестостерона. Выявленные нарушения в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы потомства дают основание говорить о трансгенерационном эффекте воздействия ЭМИ, генерируемого источниками сотовой связи, что может быть фактором, влияющим на снижение мужской фертильности.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение (ЭМИ), мобильный телефон (МТ), крысы-самцы Wistar, рождаемость, сперматогенез, сперматозоиды, жизнеспособность, тестостерон

**Для цитирования.** Чуешова, Н. В. Влияние длительного воздействия электромагнитного излучения частоты мобильного телефона на морфофункциональное состояние репродуктивной системы крыс-самцов и их потомства / Н. В. Чуешова, Ф. И. Висмонт // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2019. – Т. 63, № 2. – С. 198–206. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

**Natalya V. Chueshova<sup>1</sup>, Corresponding Member Frantisek I. Vismont<sup>2</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Belarusian State Medical University, Minsk, Republic of Belarus***LONG-TERM EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF THE MOBILE PHONE FREQUENCY ON THE MORPHOFUNCTIONAL STATE OF THE REPRODUCTIVE SYSTEM OF RATS AND MALES AND THEIR OFFSPRING**

**Abstract.** The experiment established the long-term effects of low-intensity electromagnetic radiation from a mobile phone (EMR MP 1745 MHz,  $\bar{x}_{\text{pd}} = 7.5 \pm 0.3$   $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) in the offspring of male rats from parents, one of which was either subjected to a prolonged exposure of the investigated factor. A change in the sex ratio of the born offspring and a decrease in their body weight have been established. The analysis of the reproductive system of the offspring of males when they reached the age of 2 and 4 months, revealed significant impairments, with the most pronounced changes found in the offspring obtained from both the irradiated parents or when only the male was irradiated. These changes are manifested in the disruption of the normal functioning of the spermatogenic epithelium, namely, an intensification of the initial stage of spermatogenesis is noted, with a significant inhibition at the stage of spermatid transformation. A decrease in the number of mature germ cells – spermatozoa and a pronounced deterioration of their viability, as well as an increase in testosterone secretion is established. The revealed violations in the morphofunctional state of the reproductive system of the offspring suggest that the trans-generation effect of EMR exposure generated by cellular sources can be considered as a factor affecting the decline in the male fertility.

**Keywords:** electromagnetic radiation (EMR), mobile phone (MP), male rats Wistar, fertility, spermatogenesis, spermatozoa, viability, testosterone

**For citation:** Chueshova N. V., Vismont F. I. Long-term effects of electromagnetic radiation of the mobile phone frequency on the morphofunctional state of the reproductive system of rats and males and their offspring. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 2, pp. 198–206 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-2-198-206>

**Введение.** В связи с глобальным изменением электромагнитной обстановки на Земле, существенный вклад в которую вносит внедрение подвижной сотовой радиосвязи как источника электромагнитного излучения (ЭМИ), актуальным является вопрос о влиянии данного фактора на здоровье людей, и особенно на развивающийся организм [1; 2]. В ряде исследований установлено, что несмотря на низкую интенсивность этого излучения, воздействие которого носит нетепловой характер, оно обладает высокой биологической активностью и способно вызывать нарушения в кроветворной, эндокринной, иммунной, репродуктивной системах, в нервных структурах головного мозга и рецепторах слухового и вестибулярного анализаторов, а также повышает риск развития онкологических заболеваний мозга [3–5]. В связи с этим в 2011 г. Международное агентство исследования рака ВОЗ (IARC) классифицировало электромагнитное поле (ЭМП) сотовых телефонов как возможный канцерогенный фактор для людей, присвоив ему группу канцерогенной опасности 2В [6].

Особо актуальным является вопрос о влиянии данного вида ЭМИ на состояние репродуктивной системы как мужчин, так и женщин. Иными словами – может ли воздействие ЭМИ от источников мобильной связи на одного или обоих родителей в дальнейшем отразиться на здоровье их потомков, которое зависит от качества генетического материала и репродуктивного здоровья как мужчины, так и женщины. В эпидемиологических исследованиях и в работах на животных была показана высокая чувствительность женской и мужской репродуктивной системы к воздействию ЭМИ мобильного телефона (МТ) [7]. Так, в эксперименте было установлено, что влияние ЭМИ МТ на организм крыс-самцов приводит к снижению количества, жизнеспособности и увеличению аномальных форм сперматозоидов, а также к деструктивным изменениям в семенных канальцах, уменьшению количества клеток Лейдига и нарушению синтеза тестостерона [8]. Выявлено, что длительное воздействие ЭМИ, генерируемого источниками сотовой связи, вызывает у самок крыс уменьшение количества продуцируемых овуляторных фолликулов и приводит к изменению гормонального статуса, что впоследствии сказывается на плодовитости животных [9; 10].

Учитывая современную социальную проблему растущего мужского бесплодия [11], представляет интерес изучение морфофункциональных изменений в мужской репродуктивной системе экспериментальных животных, полученных от родителей, один из которых или оба подвергались длительному воздействию ЭМИ от МТ, что позволит установить чувствительность гонад к воздействию фактору на состояние репродуктивной системы в поколении.

Цель работы – выяснение последствий длительного влияния электромагнитного излучения от мобильного телефона (1745 МГц, 8 ч/день фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, 90 суток) на организм самцов и самок крыс, при дальнейшем их спаривании с необлученными животными, на рождаемость, распределение по полу полученного поколения, а также на состояние репродуктивной системы потомства крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца.

**Материалы и методы исследования.** Исследования выполнены на белых самцах и самках крыс линии Вистар возрастом 52–54 дня и массой ♂♂ –  $158,1 \pm 3,7$ ; ♀♀ –  $142,5 \pm 4,0$  г на начало эксперимента. Животные 24 самца и 24 самки были разделены на две группы:

1. 12 самок и 12 самцов, не подвергавшиеся облучению;
2. 12 самок и 12 самцов, подвергавшиеся воздействию излучения ЭМП от МТ на протяжении трех месяцев.

Далее облученных и необлученных самцов и самок спаривали в соотношении 1 : 1 в следующих комбинациях:

1. Необлученные самки с необлученными самцами (группа контроля);
2. Облученные самки с облученными самцами;
3. Необлученные самки с облученными самцами;
4. Облученные самки с необлученными самцами.

В каждой группе использовали по 6 животных одного пола. От самок в дальнейшем получали потомство, количество которого учитывали для каждой самки. У полученного поколения в возрасте 1 месяц определяли количество самцов и самок и массу их тела. Изучение морфофункционального состояния репродуктивной системы рожденных крыс-самцов проводили при достижении ими возраста 2 и 4 месяца.

При достижении потомством определенного возраста самцов декапитировали, собирали кровь, а также выделяли семенники, эпидидимисы и семенные пузырьки. В сыворотке крови определяли содержание тестостерона методом иммуноферментного анализа (Хема-Медика, РФ) на микропланшетном фотометре TECAN SAFEIRE (Австралия). Массу репродуктивных органов измеряли на аналитических весах (Ohaus EX, Switzerland, с точностью 0,1 мг) – абсолютная масса семенников, эпидидимисов и семенных пузырьков (АМС, АМЭ, АМСП) с последующим расчетом их относительной массы (ОМ).

Левый семенник освобождали от туники и кровеносных сосудов, получали суспензию сперматогенных клеток как описано в [12]. Определение их количества проводили методом проточной цитометрии (Cytomics FC 500, Beckman Coulter, США). Различные типы половых клеток, которые были выявлены основываясь на соответствующей интенсивности флуоресценции, содержащейся в них ДНК, были обозначены как «С» значения, в качестве диплоидного стандарта использовали лейкоциты периферической крови. По содержанию ДНК клетки были классифицированы как сперматогонии (2С), прелептотенные сперматоциты (сперматоциты в S-фазе), сперматоциты I порядка (4С), круглые (1С), удлинённые (НС1) и продолговатые сперматиды (НС2). Рассчитывали индекс сперматогенеза как соотношение клеток постмейотической фазы (2С) к премейотическим (1С), который показывает общую кинетику превращения сперматогенных клеток – от сперматогониальных к круглым сперматидам.

Количество сперматозоидов, выделенных из эпидидимиса, подсчитывали в камере Горяева и оценивали их жизнеспособность методом суправитального окрашивания эозин-нигрозином [13; 14].

Все животные содержались в одинаковых стандартных (с обеспечением температурного, светового режима, полноценного питания, свободного доступа к воде, защиты от инфекций, шума и других помех окружающей среды) условиях вивария Института радиобиологии НАН Беларуси, установленных согласно «Стандартным правилам по упорядочению, оборудованию и содержанию экспериментальных биологических клиник (вивариев)».

Исследования выполнены в соответствии с этическими нормами обращения с животными с соблюдением рекомендаций и требований «Европейской конвенции по защите экспериментальных животных» (Страсбург, 86/609/ЕЕС от 24.11.1986), Хельсинской декларации Всемирной медицинской ассоциации о гуманном обращении с животными (1996) и ТКП 125–2008 «Надлежащая лабораторная практика», утвержденными постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь (№ 56 от 28.03.2008).

Источником ЭМИ являлся МТ распространенной марки, подключенный к компьютеру с сервисной программой WinTesla, позволяющей управлять его работой. Условия облучения животных: несущая частота 1745 МГц, 8 ч/день, фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, в режиме имитации разговора, т. е. излучение, близкое по своим характеристикам к ЭМИ МТ, действующему на пользователя стандарта GSM при разговоре. Телефон размещался в центральной части рабочей зоны (1 × 0,7 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Плотность потока электромагнитной энергии в клетке измерялась прибором ПЗ-41 и находилась в пределах 0,2–20,0 мкВт/см<sup>2</sup> (в зависимости от удаленности от антенны МТ), составляя в среднем  $7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>.

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами биологической статистики, используя пакеты программ Excel и GraphPad Prism 5. В качестве критерия однородности применялся однофакторный дисперсионный анализ one-way ANOVA. Для сравнения конкретных дисперсионных комплексов использовали критерий Тьюки (Tukey's test). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5 % ( $p < 0,05$ ).

**Результаты и их обсуждение.** В эксперименте нами не было выявлено значимых изменений в рождаемости потомства, оцениваемых по количеству родившегося помета на одну родившую самку, полученного от родителей один из которых или оба подвергались длительному воздействию ЭМИ от МТ. Тем не менее, необходимо отметить незначительное снижение помета в группах, где облучался лишь самец, что составляет  $9,20 \pm 1,16$  и только самка –  $9,33 \pm 2,03$  при сравнении с группой необлученных родителей –  $10,00 \pm 1,22$ , но данное снижение не было статисти-

чески значимым (табл. 1). И напротив, обнаружено увеличение количества рожденного помета у облученных самок, спаренных с облученными самцами, которое составляло  $10,33 \pm 0,33$  детеныша на одну самку.

Т а б л и ц а 1. Рождаемость, распределение по полу и масса тела потомства, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты воздействию ЭМИ от МТ

Table 1. Fertility, distribution by sex and body weight of animals obtained from parents exposed to EMR from MP with their further mating in combination with non-irradiated animals

Группа животных Group of animals	Среднее количество детенышей на самку Mean number of kids per female	Рождаемость, % к контролю от родивших самок Birth rate, % to the control from born females	Соотношение полов Sex ratio	Масса тела, г в возрасте 1 месяц Body mass, g at an age of 1 month	
			♂:♀	♂	♀
необл♀ × необл♂	10,00 ± 1,22	100,0	0,9	83,00 ± 2,81	81,73 ± 3,15
обл♀ × обл♂	10,33 ± 0,33	103,33	1,2	72,82 ± 1,60*	68,50 ± 1,22*
необл♀ × обл♂	9,20 ± 1,16	92,00	1,3	79,38 ± 1,87	75,61 ± 2,16
обл♀ × необл♂	9,33 ± 2,03	93,33	0,6	76,22 ± 2,72	76,50 ± 3,05

Примечание: \* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей при  $p \leq 0,05$ .

Note: \* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents at  $p \leq 0.05$ .

Ранее в эксперименте нами было установлено статистически значимое снижение рождаемости на 28,5 % у самок, подвергнутых влиянию ЭМИ МТ (1745 МГц,  $\bar{x}_{\text{ДПЭ}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) на протяжении трех месяцев и спаренных с облученными самцами. Но в данной модели самки продолжали облучаться на протяжении всего срока беременности [15]. В связи с чем было основание полагать, что воздействие ЭМИ от МТ в антенатальный период развития является существенным фактором при закладке и развитии эмбриона.

Наиболее важным фактом, свидетельствующим о негативном влиянии низкоинтенсивного ЭМИ МТ на организм экспериментальных животных в период их постнатального развития, было изменение соотношения полов у рожденного потомства. А именно, воздействие ЭМИ от МТ как на обоих родителей, так и только на самцов приводило к увеличению доли самцов у рожденного потомства и составляло 1,2 и 1,3 соответственно, и напротив, в группе необлученных животных и где облучалась только самка данный коэффициент составлял 0,9 и 0,6 соответственно, что указывает на превышение количества рожденных самок над самцами (табл. 1).

Обнаружено, что масса тела самцов и самок полученного потомства в возрасте 1 месяц имеет тенденцию к снижению в группах, где облучался один из родителей, а статистически значимое снижение данного параметра выявлено у детенышей, рожденных от обоих облученных родителей, что составляет 87,7 и 83,8 % ( $p < 0,05$ ) для самцов и самок соответственно по отношению к необлученной группе животных (табл. 1).

Масса тела рожденных крыс-самцов в 2-месячном возрасте не достигала контрольного значения и оставалась сниженной, но более значительное падение массы тела имело место у потомства, рожденного от обоих облученных родителей, что составляло 90,4 % ( $p < 0,05$ ) (табл. 2). У данной группы потомства выявлено также снижение абсолютной массы семенников и эпидидимисов на 7,2 и 7,1 % ( $p < 0,05$ ) и статистически значимое увеличение относительной массы семенных пузырьков на 18,8 % соответственно при сравнении с группой потомков, полученных от необлученных родителей. Выявленные изменения для данной группы животных обнаружены и при достижении ими 4-месячного возраста. А именно, абсолютная масса семенников была снижена на 5,0 % ( $p < 0,05$ ), а относительная масса семенных пузырьков превышала контрольное значение на 8,8 % ( $p < 0,05$ ).

Установлено статистически значимое снижение относительной массы семенников у 4-месячного потомства, полученного от родителей в группах, где облучался один из родителей на 5,9 и 9,9 % соответственно ( $p < 0,05$ ). Прослеживаемая тенденция в увеличении массы семенных пузырьков у потомства в 2-месячном возрасте сохранилась у 4-месячных животных, рожденных от обоих облученных родителей (на 8,8 %,  $p < 0,05$ ), и в группе где экспозиции в ЭМП подвергалась только самка (18,6 %,  $p < 0,05$ ).

Т а б л и ц а 2. Масса тела и органов репродуктивной системы крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц)

T a b l e 2. Body mass and reproductive system organs of male rats at the age of 2 and 4 months received from parents, one of which or both were exposed to EMR from MP (1745 MHz)

Массовые показатели Mass indices	Группы животных Groups of animals			
	необл♀×необл♂	обл♀×обл♂	необл♀×обл♂	обл♀×необл♂
<i>2 месяца</i>				
Масса тела	218,86 ± 8,27	197,71 ± 1,43*	203,00 ± 2,98	210,00 ± 8,67
АМС, г	1,38 ± 0,03	1,28 ± 0,01*	1,41 ± 0,07	1,30 ± 0,04
ОМС, г	0,63 ± 0,02	0,65 ± 0,01	0,69 ± 0,03	0,62 ± 0,01
АМЭ, г	0,28 ± 0,01	0,26 ± 0,002*	0,28 ± 0,02	0,26 ± 0,01
ОМЭ, г	0,13 ± 0,003	0,13 ± 0,001	0,14 ± 0,01	0,12 ± 0,002
АМСП, г	0,35 ± 0,02	0,38 ± 0,01	0,34 ± 0,03	0,37 ± 0,03
ОМСП, %	0,16 ± 0,01	0,19 ± 0,01*	0,17 ± 0,01	0,18 ± 0,01
<i>4 месяца</i>				
Масса тела	333,86 ± 6,71	326,17 ± 7,48	337,86 ± 9,06	364,25 ± 10,31
АМС, г	1,69 ± 0,02	1,61 ± 0,03*	1,62 ± 0,06	1,69 ± 0,06
ОМС, г	0,51 ± 0,01	0,49 ± 0,01	0,48 ± 0,01*	0,46 ± 0,004*
АМЭ, г	0,55 ± 0,01	0,54 ± 0,01	0,55 ± 0,02	0,57 ± 0,02
ОМЭ, г	0,17 ± 0,003	0,17 ± 0,004	0,16 ± 0,003	0,16 ± 0,002
АМСП, г	1,13 ± 0,02	1,20 ± 0,04	1,09 ± 0,04	1,34 ± 0,05*
ОМСП, %	0,34 ± 0,01	0,37 ± 0,01*	0,32 ± 0,01	0,37 ± 0,02

П р и м е ч а н и е: \* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей при  $p \leq 0,05$ .

N o t e: \* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents at  $p \leq 0.05$ .

Выявленные особенности изменений в распределении сперматогенных клеток различных популяций указывают на различную реакцию сперматогенного эпителия у поколения самцов крыс, которая зависит от того один или оба родителя были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (рис. 1). Наиболее выраженные изменения выявлены у потомства, полученного от обоих облученных родителей, и когда облучался только самец. Так, в группе, где были облучены оба родителя у потомства в 2-месячном возрасте установлено увеличение количества клеток начального звена сперматогенеза – сперматогоний (2С) и сперматоцит в S-фазе на 12,5 и 14,6 % ( $p < 0,05$ ), и снижение количества удлинённых сперматид на 18,78 % ( $p < 0,05$ ), что характеризует угнетение дифференцировки клеток завершающего этапа сперматогенеза. Более выраженное нарушение дифференцировки сперматид обнаружено у потомства, полученного от необлученной самки и облученного самца, на что указывает статистически значимое снижение количества круглых и удлинённых клеток на 12,31 и 29,2 % соответственно, при значительном на 36,0 % увеличении числа продолговатых сперматид. Близкие изменения в распределении клеток сперматогенного эпителия были выявлены и в группе, где облучалась только самка.

Восстановление нормального функционирования сперматогенного эпителия потомства крыс-самцов в отдаленном периоде – 4 месяца не происходило и наиболее значительные изменения обнаружены у потомков самцов, рожденных от обоих облученных родителей. Так, при установленной активации пролиферирующей активности эпителия, проявляемой увеличением количества сперматогоний на 16,6 % ( $p < 0,05$ ), обнаружено снижение сперматоцит I порядка, а также круглых сперматид на 20,4 и 9,1 % ( $p < 0,05$ ) соответственно при сравнении с группой животных, полученных от необлученных родителей.

При расчете индекса сперматогенеза, который отражает полный переход от сперматогоний (2С) к круглым сперматидам (1С), нами было выявлено его снижение, прослеживаемое во всех экспериментальных группах рожденного потомства, но наиболее значительное снижение обнаружено у потомства в возрасте 2 (на 16,3 %,  $p < 0,05$ ) и 4 (на 21,2 %,  $p < 0,05$ ) месяца, рожденного от обоих облученных родителей (рис. 1).

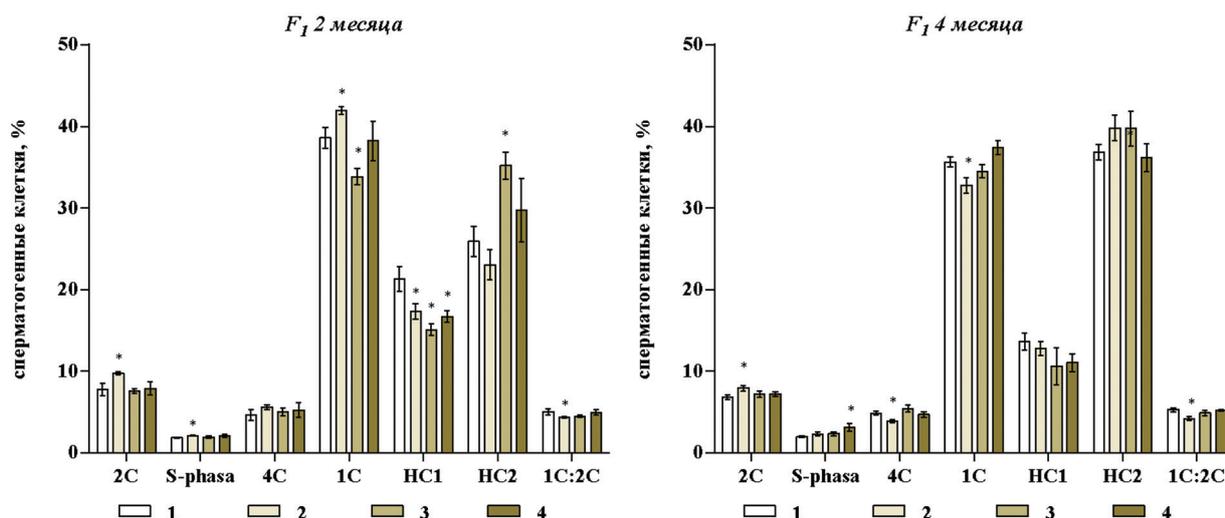


Рис. 1. Распределение клеток сперматогенного эпителия крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей (группы 1–4), один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц).

\* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей (группа 1),  $p \leq 0,05$

Fig. 1. The distribution of spermatogenic epithelium cells in male rats aged 2 and 4 months, obtained from parents (group 1–4), one of which or both were subjected to prolonged exposure to EMR from MP (1745 MHz).

\* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents (group 1),  $p \leq 0,05$

Воздействие низкоинтенсивного ЭМИ от МТ на организм самцов и самок крыс в период их постнатального развития в дальнейшем негативно сказывалось на продукции и жизнеспособности сперматозоидов у крыс-самцов полученного потомства. Так, установлено снижение количества сперматозоидов у крыс-самцов в 2-месячном возрасте, полученных при спаривании необлученной самки и облученного самца, – на 13,7 % ( $p < 0,05$ ) и облученной самки и необлученного самца – на 30,4 % ( $p < 0,05$ ). Снижение продукции сперматозоидов сохранялось и у 4-месячных животных, но статистически значимо только у потомков, полученных от облученной самки и облученного самца, на 14,5 % и от необлученной самки и облученного самца – на 11,1 % (рис. 2).

Обнаружено статистически значимое снижение жизнеспособности эпидидимальных сперматозоидов у потомства крыс-самцов в 2-месячном возрасте во всех экспериментальных группах на 12,4, 16,2 и 18,4 % соответственно при сравнении с группой животных, полученных от необлученных родителей. В отдаленном периоде – 4 месяца, сохранялась тенденция в снижении жизнеспособности сперматозоидов, что свидетельствует о высокой биологической активности и об отдаленных эффектах влияния исследуемого фактора (рис. 2).

При изучении андрогенного статуса полученного потомства по содержанию тестостерона в сыворотке крови необходимо отметить выраженную тенденцию в увеличении его концентрации, но статистически значимое лишь у 2- и 4-месячных животных (на 292,7 и 103,0 %,  $p < 0,05$ ), рожденных соответственно от необлученной самки и облученного самца и от облученной самки и необлученного самца (рис. 2).

Таким образом, в эксперименте был выявлен ряд изменений в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы крыс-самцов, полученных от родителей, один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ в период их постнатального развития, что свидетельствует о развитии отдаленных (трансгенерационных) последствий данного воздействующего фактора в поколении. Состояние репродуктивной системы имеет определяющее значение для оценки влияния электромагнитных полей на организм, поскольку данная система находится под непосредственным контролем нейроэндокринной регуляции и ее неспецифическая реакция сигнализирует о нарушении гомеостаза всего организма. Считается, что энергия ЭМИ от мобильного телефона не достаточна для того, чтобы вызвать прямые нарушения в клетках и ДНК, но способна вызывать деполяризацию клеточной мембраны, что приводит к нарушению ее функциональной целостности и как результат избыточному образованию свободных радикалов

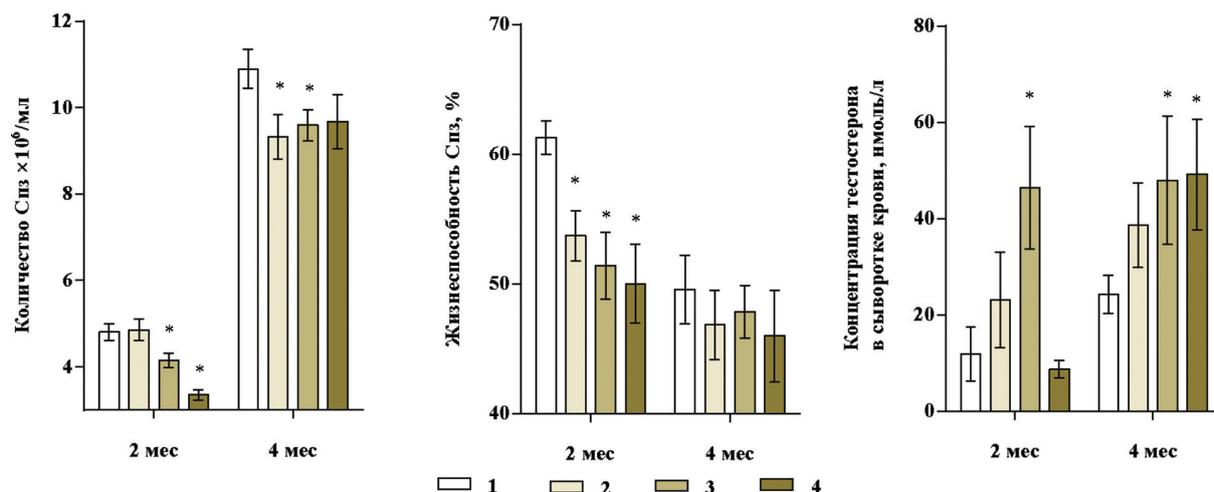


Рис. 2. Количество, жизнеспособность эпидидимальных сперматозоидов (Спз), а также концентрация тестостерона в сыворотке крови крыс-самцов в возрасте 2 и 4 месяца, полученных от родителей (группы 1–4), один из которых или оба были подвергнуты длительному воздействию ЭМИ от МТ (1745 МГц).

\* – статистически значимые различия к группе животных, рожденных от необлученных родителей (группа 1),  $p \leq 0,05$

Fig. 2. The number, viability of epididymal spermatozoa, as well as serum blood testosterone concentration in male rats aged 2 and 4 months, obtained from parents (group 1–4), one of which or both were subjected to prolonged exposure to EMR from MP (1745 MHz).

\* – statistically significant differences to the group of animals born from unirradiated parents (group 1),  $p \leq 0.05$

в клетке, которые вызывают повреждения клеточных компонентов – липидов, ДНК и белков [1; 2]. Поскольку взаимодействие биологических объектов с факторами окружающей среды реализуется благодаря генетически детерминированным процессам пролиферации и дифференцировки клеток и контролируемого обновления их популяций, выявление нарушений в репродуктивных клетках является несомненно важным показателем ранней диагностики патологий.

**Заключение.** Таким образом, длительное воздействие низкоинтенсивного ЭМИ от МТ на организм самцов и самок крыс в период их постнатального развития и дальнейшее их спаривание с необлученными и облученными животными приводит к изменению соотношения полов у полученного потомства и снижению их массы тела. Результаты исследований свидетельствуют об отдаленных эффектах влияния исследуемого фактора на состояние репродуктивной системы крыс-самцов потомков, причем наиболее выраженные изменения выявлены у потомства, полученного от обоих облученных родителей или когда облучался только самец. Данные изменения проявляются в нарушении нормального функционирования сперматогенного эпителия, а именно отмечается интенсификация начального этапа сперматогенеза при значительном его угнетении на стадии трансформации сперматид. Одновременно установлено снижение количества зрелых половых клеток – сперматозоидов и выраженное ухудшение их жизнеспособности, а также интенсификация секреции тестостерона у потомства крыс-самцов.

Выявленные особенности изменений в морфофункциональном состоянии репродуктивной системы полученного потомства крыс-самцов дают основание полагать, что низкоинтенсивное электромагнитное излучение от мобильного телефона способно вызывать трансгенерационные изменения и является фактором, приводящим к угнетению генеративной функции в поколении.

#### Список использованных источников

1. Стожаров, А. Н. Медицинская экология / А. Н. Стожаров. – Минск, 2007. – 368 с.
2. Гичев, Ю. П. Влияние электромагнитных полей на здоровье человека / Ю. П. Гичев, Ю. Ю. Гичев. – Новосибирск, 1999. – 90 с.
3. Григорьев, Ю. Г. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности / Ю. Г. Григорьев, О. А. Григорьев. – М., 2016. – 574 с.
4. Хорсева, Н. И. Влияние низкоинтенсивных электромагнитных полей на антенатальный период развития организма. Часть 1: от гаметогенеза до родов (обзор) / Н. И. Хорсева, Ю. Г. Григорьев, П. Е. Григорьев // Журн. мед.-биол. исследований. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 42–54. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42>

5. Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use / L. Hardell [et al.] // *Int. J. Oncol.* – 2013. – Vol. 43, N 6. – P. 1833–1845. <https://doi.org/10.3892/ijo.2013.2111>
6. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans [Electronic Resource]: Press Release N 208, 31 May 2011 / World Health Organization. – Mode of access: [https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208\\_E.pdf](https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf). – Date of access: 25.02.2019.
7. Верещако, Г. Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние мужской репродуктивной системы и потомство / Г. Г. Верещако. – Минск, 2015. – 186 с.
8. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis / J. A. Adams [et al.] // *Environ. Int.* – 2014. – Vol. 70. – P. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.015>
9. The effects of electromagnetic fields on the number of ovarian primordial follicles: An experimental study / M. Bakacak [et al.] // *Med. Sci.* – 2015. – Vol. 31, N 6. – P. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2015.03.004>
10. Different periods of intrauterine exposure to electromagnetic field: Influence on female rats fertility, prenatal and postnatal development / Ali S. H. Alchalabi [et al.] // *Asian Pacific J. Reprod.* – 2016. – Vol. 5, N 1. – P. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.apjr.2015.12.003>
11. Brody, S. A. Мужское бесплодие и окислительный стресс: роль диеты, образа жизни и пищевых добавок / S. A. Brody // *Андрология и генитальная хирургия.* – 2014. – Т. 15, № 3. – С. 33–41.
12. Suresh, R. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: comparative study among six species of mammals / R. Suresh, G. R. Aravindan, N. R. Moudgal // *J. Biosci.* – 1992. – Vol. 17, N 4. – P. 413–419. <https://doi.org/10.1007/bf02720096>
13. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. – 5th ed. – Geneva, 2010. – P. 26–28.
14. Влияние радиационного облучения на витаминный статус и сперматогенез крыс / В. В. Евдокимов [и др.] // *Бюл. экп. биол. и мед.* – 1997. – Т. 123, № 5. – С. 524–527.
15. Григорьев, Ю. Г. Состояние репродуктивной системы крыс-самцов в ряду поколений, полученных от облученных родителей и подвергнутых электромагнитному воздействию от мобильного телефона / Ю. Г. Григорьев, Н. В. Чуешова, Г. Г. Верещако // *Мед. радиол. и радиац. безопасность.* – 2018. – Т. 63, № 5. – С. 33–40.

## References

1. Stozharov A. N. *Medical ecology*. Minsk, 2007. 368 p. (in Russian).
2. Gichev Yu. P., Gichev Yu. Yu. *The influence of electromagnetic fields on human health*. Novosibirsk, 1999. 90 p. (in Russian).
3. Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev O. A. *Cellular communications and health: electromagnetic environment, radiobiological and hygienic problems, hazard prediction*. Moscow, 2016. 574 p. (in Russian).
4. Khorseva N. I., Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev P. E. Influence of low-intensity electromagnetic fields on the organisms' antenatal development. Part 1. From Gametogenesis to Birth (Review). *Journal of Medical and Biological Research*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 42–54. <https://doi.org/10.17238/issn2542-1298.2017.5.4.42> (in Russian).
5. Hardell L., Carlberg M., Söderqvist F., Mild K. H. Case-control study of the association between malignant brain tumours diagnosed between 2007 and 2009 and mobile and cordless phone use. *International Journal of Oncology*, 2013, vol. 43, no. 6, pp. 1833–1845. <https://doi.org/10.3892/ijo.2013.2111>
6. World Health Organization. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release N 208, 31 May 2011. Available at: [https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208\\_E.pdf](https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/07/pr208_E.pdf) (accessed 25 February 2019).
7. Vereshchako G. G. *Influence of electromagnetic radiation of mobile phones on the state of male reproductive system and offspring*. Minsk, 2015. 186 p. (in Russian).
8. Adams J. A., Galloway T. S., Mondal D., Esteves S. C., Mathews F. Effect of mobile telephones on sperm quality: a systematic review and meta-analysis. *Environment International*, 2014, vol. 70, pp. 106–112. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.04.015>
9. Bakacak M., Bostanci M. S., Attar R., Yildirim Ö. K., Yildirim G., Bakacak Z., Sayar H., Han A. The effects of electromagnetic fields on the number of ovarian primordial follicles: An experimental study. *The Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 2015, vol. 31, no. 6, pp. 287–292. <https://doi.org/10.1016/j.kjms.2015.03.004>
10. Alchalabi Ali S. H., Aklilu E., Aziz Abd R., Malek F., Ronald S. H., Khan M. A. Different periods of intrauterine exposure to electromagnetic field: Influence on female rats' fertility, prenatal and postnatal development. *Asian Pacific Journal of Reproduction*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 14–23. <https://doi.org/10.1016/j.apjr.2015.12.003>
11. Brody S. A. Male factor infertility and oxidative stress: role of diet, lifestyle and nutritional supplements. *Andrologiya i genital'naya hirurgiya = Andrology and Genital Surgery*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 33–41 (in Russian).
12. Suresh R., Aravindan G. R., Moudgal N. R. Quantitation of spermatogenesis by DNA flow cytometry: comparative study among six species of mammals. *Journal of Biosciences*, 1992, vol. 17, no. 4, pp. 413–419. <https://doi.org/10.1007/bf02720096>
13. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. 5th ed. Geneva, 2010, pp. 26–28.
14. Evdokimov V. V., Kodentsova V. M., Vrzhesinskaya O. A., Yakushina L. M., Erasova V. I., Kirpatovsiky V. I., Sakharov I. Y. Influence of radiation on vitamin status and spermatogenesis in rats. *Byulleten' Eksperimental'noi Biologii i Meditsiny = Bulletin of Experimental Biology and Medicine*, 1997, vol. 123, no. 5, pp. 524–527 (in Russian).

15. Grigoriev Yu. G., Chueshova N. V., Vereschako G. G. Reproductive system state among generations of male rats, obtained from irradiated parents and subjected to electromagnetic interference from mobile phone (1745 MHz). *Medical Radiology and Radiation Safety*, 2018, vol. 63, no. 5, pp. 33–40. [https://doi.org/10.12737/article\\_5bc89628800007.23290426](https://doi.org/10.12737/article_5bc89628800007.23290426)

### Информация об авторах

*Чуешова Наталья Владимировна* – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [natalya-chueshova@tut.by](mailto:natalya-chueshova@tut.by).

*Висмонт Франтишек Иванович* – член-корреспондент, д-р мед. наук, профессор, заведующий кафедрой. Белорусский государственный медицинский университет (пр. Дзержинского, 83, 220116, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [patfiz@bsmu.by](mailto:patfiz@bsmu.by).

### Information about the authors

*Chueshova Natalya Vladimirovna* – Researcher. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [natalya-chueshova@tut.by](mailto:natalya-chueshova@tut.by).

*Vismont Frantisek Ivanovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Medicine), Professor, Head of the Department. Belarusian State Medical University (83, Dzerzhinski Ave., 220116, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [patfiz@bsmu.by](mailto:patfiz@bsmu.by).