

ISSN 1814-6023 (Print)  
ISSN 2524-2350 (Online)

УДК 614.875:537.872:52-77+599.323.4+591.3:591.463.1  
<https://doi.org/10.29235/1814-6023-2019-16-2-216-225>

Поступила в редакцию 03.03.2019  
Received 03.03.2019

**Н. В. Чуешова<sup>1</sup>, Ф. И. Висмонт<sup>2</sup>, И. А. Чешик<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт радиобиологии НАН Беларуси, Гомель, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Белорусский государственный медицинский университет, Минск, Республика Беларусь*

## **ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ МОБИЛЬНОГО ТЕЛЕФОНА (1745 МГц) НА СОСТОЯНИЕ РЕПРОДУКТИВНОЙ СИСТЕМЫ КРЫС-САМЦОВ В ПЕРИОД ИХ ПОСТНАТАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ**

**Аннотация.** Проведена комплексная оценка морфофункциональных изменений в репродуктивной системе крыс-самцов нескольких возрастных групп, начиная с препубертатного периода (50–52 дня) и до достижения ими половозрелого возраста (4,5 мес.), подверженных воздействию низкоинтенсивного электромагнитного излучения (ЭМИ) от мобильного телефона (МТ) (1745 МГц, плотность потока энергии 0,2–20 мкВт/см<sup>2</sup>).

Установлено, что воздействие ЭМИ от МТ (на протяжении 7 сут) на организм крыс-самцов в период их полового созревания приводит к изменениям в развивающейся репродуктивной системе, характеризующимся увеличением массы эпидидимисов и семенных пузырьков, развитием дегенеративных изменений в семенниках в виде угнетения пролиферативной активности и активацией дифференцировки клеток сперматогенного эпителия – сперматид. Эти изменения сопровождаются значительным увеличением количества эпидидимальных сперматозоидов (раннее половое созревание) и снижением их жизнеспособности на фоне уменьшения концентрации тестостерона в сыворотке крови. Напротив, длительное (на протяжении 60 и 90 сут) воздействие ЭМИ от МТ на организм крыс-самцов начиная с раннего пубертатного периода и до достижения ими половозрелого возраста характеризуется слабо выраженной реакцией сперматогенного эпителия, но значительным снижением количества сперматозоидов и их жизнеспособности, а также увеличением концентрации тестостерона в сыворотке крови.

Комплекс выявленных морфофункциональных нарушений в репродуктивной системе крыс-самцов свидетельствует об угнетении ее функции в условиях воздействия низкоинтенсивного ЭМИ от МТ, что может быть фактором, влияющим на снижение мужской фертильности.

**Ключевые слова:** электромагнитное излучение, мобильный телефон, репродуктивная система крыс-самцов, сперматогенез, сперматозоиды, жизнеспособность, фрагментация ДНК сперматозоидов, тестостерон

**Для цитирования:** Чуешова, Н. В. Влияние электромагнитного излучения от мобильного телефона (1745 МГц) на состояние репродуктивной системы крыс-самцов в период их постнатального развития / Н. В. Чуешова, Ф. И. Висмонт, И. А. Чешик // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. мед. наук. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 216–225. <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2019-16-2-216-225>

**N. V. Chueshova<sup>1</sup>, F. I. Vismont<sup>2</sup>, I. A. Cheshyk<sup>1</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*

## **EFFECT OF ELECTROMAGNETIC RADIATION FROM A MOBILE PHONE (1745 MHz) ON THE CONDITION OF THE REPRODUCTIVE SYSTEM OF MALE RATS DURING THEIR POSTNATAL DEVELOPMENT**

**Abstract.** A comprehensive assessment of the morphofunctional changes in the reproductive system of male rats of several age groups was carried out, starting from the prepubertal period (50–52 days) and until they reach puberty (4,5 months) under the conditions of exposure to low-intensity electromagnetic radiation from a mobile phone (EMR MP, 1745 MHz, power density of 0.2–20  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ).

It was established that the nature of the revealed morphofunctional changes in the reproductive system of male rats exposed to low-intensity EMR from MT largely depends on the exposure duration and the age of animals.

The impact of EMR from MT (for 7 days) on the body of male rats during puberty leads to significant changes in the developing reproductive system. Namely, against the background of an increase in the mass of epididymis and seminal vesicles, the development of degenerative changes in the testes was revealed, manifested by the inhibition of the proliferative activity and the activation of differentiation of spermatogenic epithelial cells – spermatids, which is accompanied by a significant increase in the number of epididymal spermatozoa (early puberty), while their viability decreases and serum testosterone concentrations increase. On the contrary, the prolonged (for 60 and 90 days) exposure of EMR from MT to the

organism of male rats from the early puberty period and until they reach puberty is characterized by a weakly expressed spermatogenic epithelium reaction, but also the most characteristic decrease in the number and viability of spermatozoa, as well as by the increase in concentration of testosterone in blood serum.

The complex of identified disorders in the morphofunctional state of the reproductive system of male rats indicates the inhibition of its function under the influence of low-intensity EMR from MT, which may be a factor affecting the decline in male fertility.

**Keywords:** electromagnetic radiation, mobile phone, reproductive system of male rats, spermatogenesis, spermatozoa, viability, sperm DNA fragmentation, testosterone

**For citation:** Chueshova N. V., Vismont F. I., Cheshyk I. A. Effect of electromagnetic radiation from a mobile phone (1745 MHz) on the condition of the reproductive system of male rats during their postnatal development. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya meditsinskikh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Medical series*, 2019, vol. 16, no. 2, pp. 216–225 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1814-6023-2019-16-2-216-225>

**Введение.** Интенсивное проникновение все новых антропогенных источников электромагнитных полей (ЭМП) в повседневную жизнь человека привело к формированию нового фактора загрязнения окружающей среды – электромагнитного [1]. Однако достижения в области технологии, сопровождающиеся все возрастающими интенсивностью и частотой излучаемых электромагнитных волн, не учитывают последствий воздействия последних на здоровье человека [2].

Одним из основных источников электромагнитного излучения (ЭМИ), действующего на организм человека, является широко используемая подвижная сотовая радиосвязь. Как источник неионизирующего излучения она действует на все слои населения, включая новорожденных, детей, беременных женщин и лиц пожилого возраста [3]. Несмотря на низкую интенсивность этого излучения, воздействие которого носит нетепловой характер [4], оно обладает высокой биологической активностью и способно вызывать нарушения в нервных структурах головного мозга и рецепторах слухового и вестибулярного анализаторов, а также повышает риск развития онкологических заболеваний в мозге [2]. В связи с этим в 2011 г. Международное агентство исследования рака ВОЗ (IARC) классифицировало ЭМП сотовых телефонов как возможный канцерогенный фактор для людей (группа канцерогенной опасности 2B) [5]. Согласно предварительным результатам Национальной токсикологической программы (National toxicology program, США), развитие раковых опухолей сердца и в меньшей степени мозга и надпочечников отмечается у крыс-самцов, подвергшихся воздействию высокого уровня радиочастотного излучения, сопоставимого с сотовой связью стандартов 2G и 3G [6].

В настоящее время растет обеспокоенность в связи с наблюдаемым повышением доли мужского бесплодия (до 45 % в бесплодном браке), которое во многом является следствием снижения качества и концентрации спермы. Известно также о негативном влиянии на процесс сперматогенеза и таких факторов, как стресс, курение, ионизирующая радиация и химические вещества [7]. К настоящему времени проведены многочисленные исследования по изучению эффектов воздействия ЭМИ от мобильного телефона (МТ) на репродуктивную систему [8], однако результаты их весьма противоречивы. В то же время в большинстве работ показано, что воздействие данного вида излучения приводит к дегенеративным изменениям сперматогенного эпителия, снижению параметров сперматозоидов, изменению андрогенного статуса [9, 10]. Учитывая повсеместность использования МТ как взрослым населением, так и детьми школьного возраста, представляется актуальным изучение длительного влияния низкоинтенсивного ЭМИ, генерируемого МТ, на морфофункциональное состояние мужской репродуктивной системы начиная с периода ее формирования.

Цель настоящей работы – комплексная оценка морфофункциональных изменений в репродуктивной системе крыс-самцов начиная с периода ее формирования и развития (50–52 дня) и до достижения ими половозрелого возраста (4,5 мес.) в условиях воздействия низкоинтенсивного электромагнитного излучения от мобильного телефона (1745 МГц).

**Материалы и методы исследования.** Исследования выполнены на 120 белых крысах-самцах беспородной линии (исходный генотип Wistar) в возрасте 50–52 сут и массой  $139,0 \pm 5,9$  г на начало эксперимента. Все животные ( $n = 60$ ) были разделены на две группы: 1 – контроль; 2 – животные, подвергнутые воздействию ЭМИ от МТ на протяжении 90 сут. Анализ состояния репродуктивной системы крыс-самцов проводили на 1-е и 30-е сутки после прекращения воздей-

ствия ЭМИ от МТ на протяжении 1, 7, 30, 60 и 90 сут. Каждой экспериментальной группе ( $n = 6$ ) соответствовал контроль – животные аналогичного возраста ( $n = 6$ ).

Все животные, согласно «Стандартным правилам по упорядочению, оборудованию и содержанию экспериментальных биологических клиник (вивариев)», содержались в одинаковых стандартных условиях вивария Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии НАН Беларуси».

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 г), 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 г).

Источником ЭМИ был МТ, подключенный к компьютеру с сервисной программой WinTesla, позволяющей управлять его работой. Условия облучения животных: несущая частота 1745 МГц, 8 ч/сут, фракциями по 30 мин с интервалом в 5 мин, в режиме имитации разговора, т. е. уровень излучения был близок по своим характеристикам к ЭМИ МТ стандарта GSM-1800, воздействующему на пользователя при разговоре. Телефон был размещен в центральной части рабочей зоны ( $1 \times 0,7$  м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Измеряемая прибором ПЗ-41 плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) в клетке находилась в пределах  $0,2\text{--}20,0$  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>.

На 1-е и 30-е сутки после прекращения воздействий в течение 1, 7, 30, 60 и 90 сут предварительно взвешенных животных декапитировали, после чего производили забор крови, выделяли семенники, эпидидимисы и семенные пузырьки. Содержание тестостерона в сыворотке крови определяли методом иммуноферментного анализа (ООО «Хема-Медика», РФ), используя микропланшетный фотометр TECAN SAFEIRE (Австралия). Массу репродуктивных органов измеряли на аналитических весах (Ohaus EX, Швейцария) с точностью до 0,1 мг.

Источником сперматогенных клеток являлся левый семенник, который освобождали от туники и кровеносных сосудов и получали суспензию клеток, как описано ранее в работе [11]. Для определения их количества использовали метод проточной цитометрии (Cytomics FC 500, Beckman Coulter, США). Различные типы половых клеток, выявленных с помощью соответствующей интенсивности флуоресценции содержащейся в них ДНК, были обозначены как С. 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), удлиненные (HC1) и продолговатые сперматиды (HC2).

Сперматозоиды выделяли из эпидидимиса, подсчитывали их количество в камере Горяева [12] и методом суправитального окрашивания эозин-нигрозином определяли их жизнеспособность [13]. Структуру хроматина сперматозоидов на наличие одно- и двухцепочечных разрывов цепи ДНК анализировали путем окрашивания акридиновым оранжевым, используя метод SCSA (Sperm Chromatin Structure Assay), приведенный в работе [14]. Количество сперматозоидов с фрагментированной ДНК подсчитывали на проточном цитометре.

В связи с тем что в литературе имеются данные о том, что у животных в течение суток происходят значительные колебания уровня ряда гормонов и биогенных аминов в крови, которые сопровождаются изменениями в энергетическом и пластическом обмене, опыты проводили в строго определенное время – с 8.30 до 12.00.

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами биологической статистики, используя пакеты программ Excel и GraphPad Prism 5. При сравнении двух независимых групп по количественному признаку использовали критерий Манна–Уитни (Mann–Whitney test). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5 % ( $p < 0,05$ ).

**Результаты и их обсуждение.** Установлено, что воздействие низкоинтенсивного ЭМИ от МТ на протяжении 1-х суток не повлияло на массу органов репродуктивной системы (см. таблицу).

Напротив, по окончании 7-дневного (кратковременного) воздействия у экспериментальных животных обнаружено увеличение абсолютной массы эпидидимисов и семенных пузырьков на 38,5 и 100,0 % соответственно ( $p < 0,05$ ).

**Масса репродуктивных органов крыс-самцов на 1-е и 30-е сутки после прекращения воздействия ЭМИ от МТ в течение 1, 7, 30, 60 и 90 сут**

**Mass of reproductive organs of male rats on the 1<sup>st</sup> and 30<sup>th</sup> days after the cessation of exposure to EMR from MP during the 1, 7, 30, 60 and 90 days**

Репродуктивные органы	1-е сутки после прекращения воздействия		30-е сутки после прекращения воздействия	
	Контроль	ЭМИ	Контроль	ЭМИ
1-е сутки воздействия ЭМИ				
Семенники	0,60 ± 0,09	0,54 ± 0,13	1,37 ± 0,06	1,38 ± 0,05
Эпидидимисы	0,08 ± 0,01	0,08 ± 0,01	0,33 ± 0,02	0,34 ± 0,01
Семенные пузырьки	0,08 ± 0,01	0,09 ± 0,02	1,05 ± 0,17	1,00 ± 0,06
7-е сутки воздействия ЭМИ				
Семенники	0,89 ± 0,07	1,05 ± 0,06	1,39 ± 0,05	1,29 ± 0,05
Эпидидимисы	0,13 ± 0,01	0,18 ± 0,01*	0,38 ± 0,01	0,34 ± 0,03
Семенные пузырьки	0,13 ± 0,01	0,26 ± 0,03*	1,04 ± 0,06	0,80 ± 0,10
30-е сутки воздействия ЭМИ				
Семенники	1,32 ± 0,05	1,51 ± 0,06*	1,48 ± 0,07	1,37 ± 0,03
Эпидидимисы	0,34 ± 0,01	0,37 ± 0,02	0,45 ± 0,02	0,42 ± 0,01
Семенные пузырьки	0,70 ± 0,03	0,76 ± 0,08	1,17 ± 0,04	0,97 ± 0,07*
60-е сутки воздействия ЭМИ				
Семенники	1,32 ± 0,03	1,50 ± 0,04*	1,63 ± 0,05	1,55 ± 0,04
Эпидидимисы	0,37 ± 0,02	0,42 ± 0,02	0,49 ± 0,02	0,47 ± 0,01
Семенные пузырьки	0,90 ± 0,05	0,87 ± 0,04	1,37 ± 0,07	1,13 ± 0,09
90-е сутки воздействия ЭМИ				
Семенники	1,61 ± 0,08	1,63 ± 0,03	1,43 ± 0,05	1,66 ± 0,07*
Эпидидимисы	0,48 ± 0,02	0,49 ± 0,01	0,49 ± 0,02	0,52 ± 0,04
Семенные пузырьки	1,16 ± 0,08	1,34 ± 0,08	1,65 ± 0,07	1,69 ± 0,20

Примечание. \* – статистически значимые отличия от контроля ( $p < 0,05$ ).

Повышение массы репродуктивных органов сохранялось и при 30-дневном (продолжительном) воздействии, но статистически значимое для семенников, масса которых увеличивалась на 14,4 % при сравнении с таковой у необлученных животных.

Длительное пребывание в ЭМП МТ на протяжении 60 сут приводило к повышению массы семенников на 13,6 % ( $p < 0,05$ ), в то время как более продолжительное электромагнитное воздействие (до 90 сут) сказывалось на увеличении массы как эпидидимисов, так и семенников и семенных пузырьков (обнаруженные изменения были статистически не значимыми).

В отдаленном периоде (30-е сутки) после прекращения электромагнитного воздействия для всех изучаемых сроков отмечено восстановление массы органов репродуктивной системы, за исключением статистически значимого снижения массы семенных пузырьков и возрастание веса семенников на 17,1 и 16,1 % соответственно в условиях экспозиции 30 и 90 сут.

Выявленные особенности изменений в распределении сперматогенных клеток различных популяций указывают на различную реакцию сперматогенного эпителия при воздействии ЭМИ МТ, которая зависит от длительности облучения (рис. 1). Так, если на 1-е сутки после однодневного облучения наблюдалось снижение продолговатых сперматид на 42,1 % (угнетение на завершающем этапе сперматогенеза,  $p < 0,05$ ), то при 7- и 30-суточном воздействии выявлены более значимые и однонаправленные изменения, характеризующие угнетение пролиферирующей активности сперматогенного эпителия, что проявлялось снижением количества сперматогоний на 25,7 и 22,0 % соответственно ( $p < 0,05$ ) и активацией дифференцировки клеток, а именно увеличением количества продолговатых сперматид на 87,7 и 23,3 % ( $p < 0,05$ ). Спустя 30 сут после

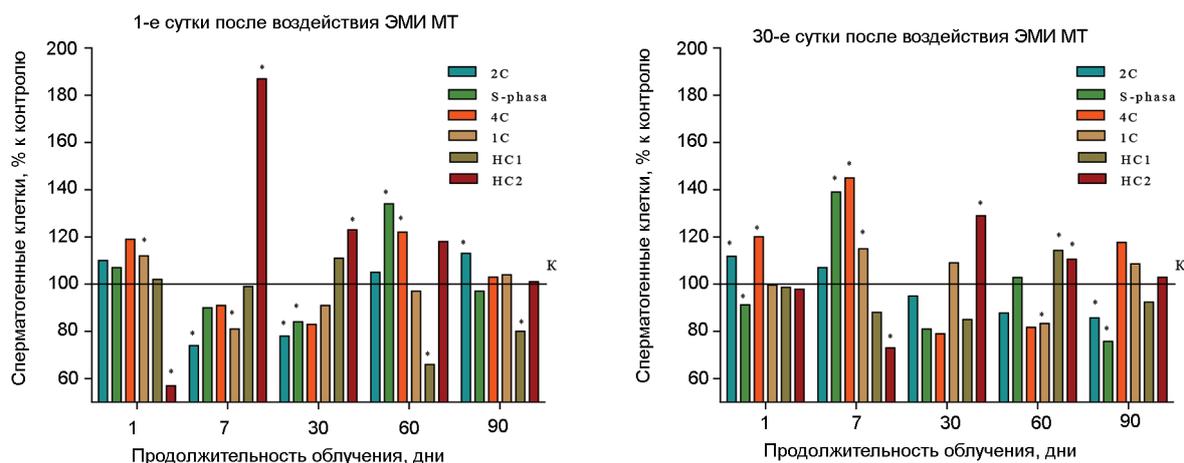


Рис. 1. Количество сперматогенных клеток различных популяций на 1-е и 30-е сутки после прекращения воздействия ЭМИ от МТ на протяжении 1, 7, 30, 60 и 90 сут. К – линия контроля. \* – статистически значимые различия по сравнению с контролем ( $p < 0,05$ )

Fig. 1. Number of spermatogenic cells of different populations of the test tissue of male rats on the 1st and 30th day after the cessation of exposure to EMR from MP for 1, 7, 30, 60 and 90 days. K – control line. \* – statistically significant differences when compared with the control ( $p < 0.05$ )

прекращения кратковременного (1 и 7 сут) воздействия установлено увеличение числа клеток на начальном этапе сперматогенеза, что указывает на восстановление сперматогенного цикла. Тем не менее, значительное снижение количества продолговатых сперматид на 27,0 % в отдаленный период после прекращения воздействия ЭМИ от МТ в течение 7 сут может свидетельствовать о нарушении регуляции синтеза белков – факторов роста (эпидермальный, инсулиноподобные, трансформирующие факторы роста), ответственных за эндокринную, аутокринную и паракринную регуляцию процессов пролиферации и дифференцировки клеток [15].

Установлено, что длительное воздействие на протяжении 60 и 90 сут сопровождается однонаправленными изменениями в количественном распределении сперматогенных клеток (рис. 1). Обнаруженное увеличение количества клеток начального звена сперматогенеза, таких как сперматоциты в S-фазе и сперматоциты I порядка на 22,5 и 34,1 % ( $p < 0,05$ ) при 60-дневном воздействии, а также сперматогоний на 13,6 % ( $p < 0,05$ ) при 90-дневном облучении, можно рассматривать как компенсаторную реакцию сперматогенного эпителия на уменьшение количества удлиненных сперматид, клеток завершающего этапа сперматогенеза на 43,8 и 19,8 % соответственно ( $p < 0,05$ ) при 60- и 90-дневном воздействии. Спустя 30 сут после прекращения 90-дневной экспозиции в ЭМП МТ обнаружено снижение количества сперматогоний и сперматоцит в прелептотене на 14,3 и 24,3 %, что указывает на угнетение начального этапа сперматогенеза. Данный факт свидетельствует о уязвимости пролиферирующих клеток (сперматогоний) сперматогенного эпителия к электромагнитному излучению в отдаленном периоде после прекращения облучения.

Анализ продукции спермиогенеза, оцениваемый по количеству эпидидимальных сперматозоидов, показал их отсутствие у крыс-самцов после однодневной экспозиции и у контрольных животных в связи с их возрастом (рис. 2). В то же время установлено, что относительно кратковременное облучение в течение 7 сут оказывает стимулирующее влияние на репродуктивную систему облученных крыс-самцов, что отразилось на продукции зрелых половых клеток: их число было значительно выше (на 216 %), чем в контрольной группе ( $p < 0,05$ ). Это коррелирует с выявленным ростом количества продолговатых сперматид в тестикулярной ткани, что можно рассматривать как преждевременное половое созревание. По мнению N. Zareen [16], преждевременное половое созревание является результатом инициации функционирования гипоталамо-гипофизарно-гонадной оси, проявляющийся ранним сперматогенезом.

Установлено, что воздействие ЭМИ от МТ на протяжении 30 и 60 сут привело к повышению количества сперматозоидов до 130,5 и 109,1 %, и, напротив, у крыс-самцов в условиях 90-днев-

ной экспозиции данный показатель был ниже на 8,0 %, чем в группе необлученных животных, но эти изменения не носили статистически значимого характера.

В отдаленный период после прекращения электромагнитного воздействия различной продолжительности на 30-е сутки обнаружено снижение количества зрелых половых клеток, но статистически значимым оно было лишь для 60-дневной экспозиции (на 13,3 % при сравнении с контрольным значением). Интересным представляется выявленное в этот период снижение количества сперматозоидов на 23,9 % после 7-дневной экспозиции, несмотря на то что на 1-е сутки после прекращения облучения их число значительно превышало контрольный уровень (рис. 2).

Жизнеспособность эпидидимальных сперматозоидов на 1-е сутки после прекращения электромагнитной экспозиции на протяжении от 1 до 90 сут значительно снижалась, и в подавляющем большинстве опытов это снижение носило статистически значимый характер (рис. 2). Максимальное снижение этого показателя составляло 29,2 и 34,0 % соответственно ( $p < 0,05$ ) после 7- и 60-дневного облучения. На 30-е сутки после прекращения облучения животных в течение 7 и 60 сут жизнеспособность сперматозоидов оставалась сниженной и составляла 79,5 и 82,5 % ( $p < 0,05$ ) при сравнении с контрольным уровнем.

В настоящее время анализ спермального хроматина на наличие одно- и двунитевых разрывов ДНК позволяет судить об оплодотворяющей способности половой клетки [14]. Полученные нами данные свидетельствуют об отсутствии изменений данного показателя на 1-е сутки после кратковременного (1, 7 и 30 сут) и длительного (60 и 90 сут) электромагнитного облучения. Однако спустя 30 сут обнаружено статистически значимое увеличение (на 19,0 %) фрагментации ДНК в сперматозоидах экспериментальных животных.

Известно, что размеры и нормальное функционирование половых органов зависят от уровня тестостерона. В эксперименте получены данные, которые позволили оценить динамику содержания тестостерона в сыворотке крови, секреция которого указывает на работу гормонпродуцирующих интерстициальных клеток Лейдига и, соответственно, на их чувствительность к воздействию ЭМИ от МТ. Так, установлено снижение концентрации тестостерона в сыворотке крови экспериментальных животных на 1-е и 30-е сутки после 30-дневной экспозиции на 42,5 и 75,8 % соответственно ( $p < 0,05$ ) при сравнении с группой необлученных животных (рис. 2). Напротив, на 30-е сутки после 1-дневного воздействия ЭМИ от МТ установлено статистически значимое увеличение данного показателя на 104,9 % ( $p < 0,05$ ). Концентрация тестостерона на 1-е сутки после 60 сут облучения также повысилась – на 156,6 % ( $p < 0,05$ ), а спустя 30 сут после 90 дней экспозиции – на 200,1 % ( $p < 0,05$ ).

Необходимо отметить, что большинство исследователей считают, что угнетение секреции тестостерона под влиянием ЭМИ от МТ объясняется снижением количества гормонпродуцирующих клеток Лейдига [17]. Однако ряд авторов [18, 19] пришли к заключению, что воздействие ЭМИ от МТ (GSM 1800 МГц), допустимый уровень которого ниже максимально рекомендованного ICNIRP (2,0 Вт/кг), вызывает повышение уровня тестостерона, что и установлено нами при длительном экспонировании животных.

Предполагается, что основным механизмом метаболических изменений в клетках при действии ЭМИ мобильной связи является процесс, получивший название «окислительный стресс». Под действием ЭМП могут изменяться скорость диффузии через биологические мембраны, ориентация и конфирмация биологических макромолекул, вследствие чего отмечается избыточное образование свободных радикалов в клетке, которые в свою очередь вызывают повреждения клеточных компонентов [9, 20].

Таким образом, нами установлен ряд изменений в состоянии репродуктивной системы неполовозрелых животных, подвергнутых воздействию ЭМИ, генерируемого МТ, которые можно охарактеризовать как инициацию сперматогенного процесса, проявляющегося ранним сперматогенезом – преждевременным половым созреванием. Анализ изменений морфофункционального состояния репродуктивной системы крыс-самцов, подвергнутых длительному воздействию ЭМИ, указывает на угнетение пролиферирующей активности сперматогенного эпителия в отдаленном периоде. По мнению М. Markov с соавт. [21], несмотря на то что ЭМИ от МТ низкоинтенсивное, его повторное или длительное воздействие носит кумулятивный характер и опосредова-

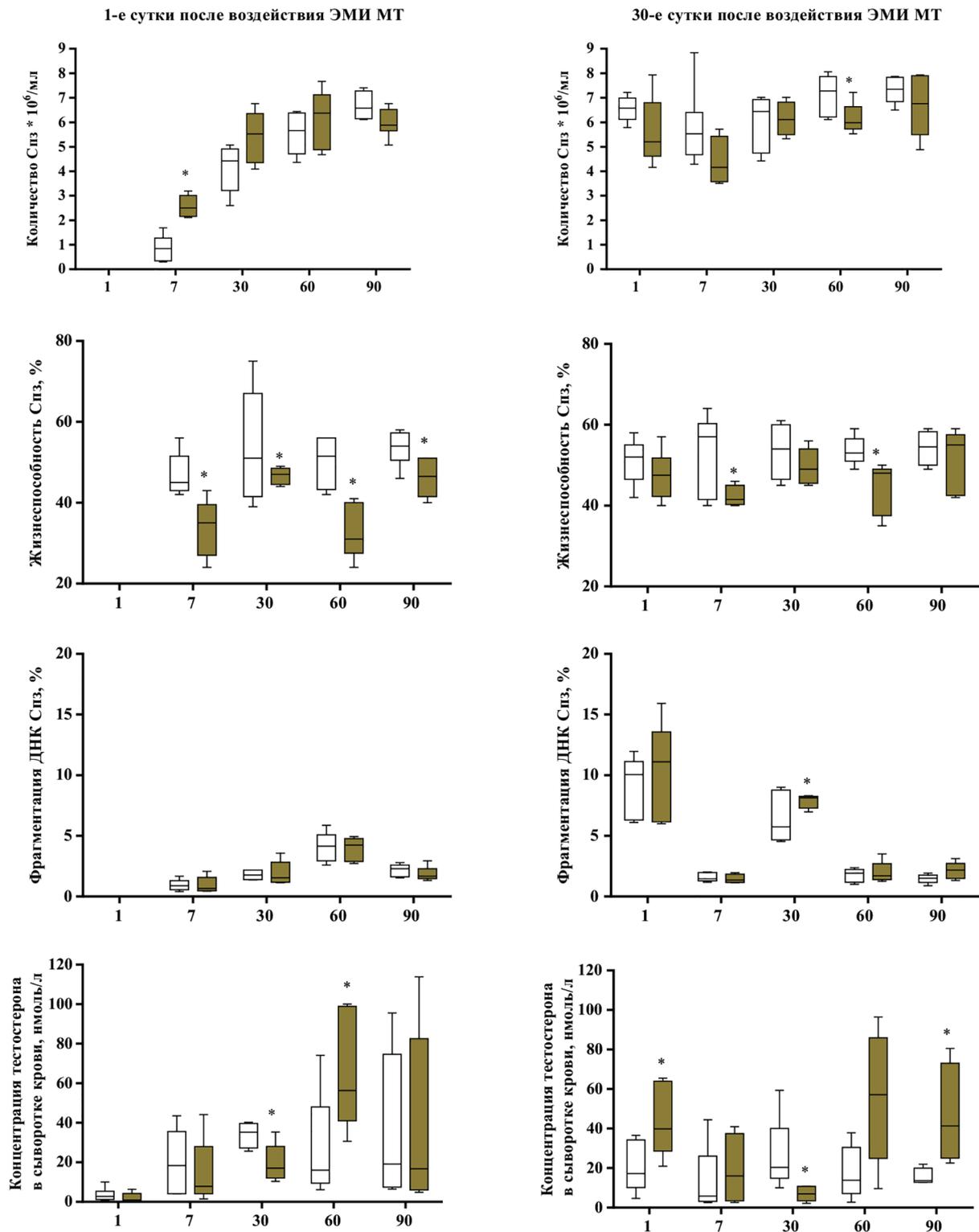


Рис. 2. Количество, жизнеспособность, фрагментация ДНК эпидидимальных сперматозоидов, а также концентрация тестостерона в сыворотке крови крыс-самцов на 1-е и 30-е сутки после прекращения влияния ЭМИ от МТ на протяжении 1, 7, 30, 60 и 90 сут. Данные представлены как медиана, интерквантильный интервал 25–75 % (min–max);

\* – статистически значимые различия по сравнению с контролем при  $p < 0,05$

Fig. 2. The number, viability, DNA fragmentation of epididymal spermatozoa, as well as the serum testosterone concentration in male rats on the 1st and 30th days after the cessation of the influence of EMR from MT for 1, 7, 30, 60 and 90 days. Data are presented as median, inter-quantile range 25–75 % and span min–max; \* – statistically significant differences when compared with the control at  $p < 0.05$

но через нервно-эндокринную систему, способно оказывать влияние на функциональную активность органов и тканей организма. Другими словами, развитие патологических изменений в организме при длительном использовании МТ связано с накопительными процессами нарушений в регуляторных системах, что необходимо учитывать при разработке соответствующих стандартов.

Тем не менее, полученные нами данные дают основание утверждать, что ЭМИ от МТ является потенциально негативным фактором в отношении мужской репродуктивной системы, особенно в период ее формирования и развития.

**Заключение.** Характер выявленных нами морфофункциональных изменений в репродуктивной системе крыс-самцов в условиях воздействия низкоинтенсивного ЭМИ от МТ (1745 МГц, ППЭ = 0,2–20 мкВт/см<sup>2</sup>,  $\tilde{x}_{\text{ППЭ}} = 7,5 \pm 0,3$  мкВт/см<sup>2</sup>) в значительной мере зависит от длительности экспозиции и возраста животных.

Воздействие ЭМИ от МТ на организм крыс-самцов в период полового созревания приводит к морфофункциональным изменениям в развивающейся репродуктивной системе, характеризующимся увеличением массы эпидидимисов и семенных пузырьков, развитием дегенеративных изменений в семенниках, проявляющихся угнетением пролиферативной активности и активацией дифференцировки клеток сперматогенного эпителия – сперматид. Эти изменения сопровождаются значительным увеличением количества эпидидимальных сперматозоидов (преждевременное половое созревание) и снижением их жизнеспособности на фоне падения концентрации тестостерона в сыворотке крови.

Длительное (на протяжении 60 и 90 сут) воздействие ЭМИ от МТ на организм крыс-самцов половозрелого возраста характеризуется слабо выраженной реакцией сперматогенного эпителия. Наиболее характерные нарушения при длительном влиянии ЭМИ от МТ – снижение количества сперматозоидов и их жизнеспособности, а также увеличение концентрации тестостерона в сыворотке крови.

Таким образом, характер морфофункциональных изменений в репродуктивной системе крыс-самцов свидетельствует об угнетении генеративной функции в условиях воздействия низкоинтенсивного ЭМИ от МТ, что дает основание полагать о влиянии данного фактора на снижение мужской фертильности.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Список использованных источников

1. Кудряшов, Ю. Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения: учебник для вузов / Ю. Б. Кудряшов, Ю. Ф. Перов, А. Б. Рубин. – М. : Физматлит, 2008. – 181 с.
2. Григорьев, Ю. Г. От электромагнитного смога до электромагнитного хаоса. К оценке опасности мобильной связи для здоровья населения / Ю. Г. Григорьев // Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2018. – Т. 63, № 3. – С. 28–33.
3. Стожаров, А. Н. Медицинская экология: учеб. пособие / А. Н. Стожаров. – Минск : Выш. шк., 2007. – 368 с.
4. 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>
5. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans // IARC Press Release / WHO. – 2011. – N 208. – 6 p.
6. Report of partial findings from the national toxicology program carcinogenesis studies of cell phone radiofrequency radiation in Hsd: Sprague dawley® SD rats (whole body exposure) / M. Wyde [et al.] // BioRxiv. – 2018. – 87 p. <https://doi.org/10.1101/055699>
7. 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.
8. Верещако, Г. Г. Влияние электромагнитного излучения мобильных телефонов на состояние мужской репродуктивной системы и потомство / Г. Г. Верещако. – Минск : Беларус. навука, 2015. – 186 с.
9. Hamada, A. J. Cell phones and their impact on male fertility: fact or fiction / A. J. Hamada, A. Singh, A. Agarwal // Open Reprod. Sci. J. – 2011. – Vol. 5. – P. 125–137. <https://doi.org/10.2174/1874255601103010125>
10. 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. исслед. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 42–54.

11. 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>
12. Влияние радиационного облучения на витаминный статус и сперматогенез крыс / В. В. Евдокимов [и др.] // *Бюл. эксперим. биол. и мед.* – 1997. – Т. 123, № 5. – С. 524–527.
13. World Health Organization. WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen. – 5th ed. – Geneva : WHO Press, 2010. – 271 p.
14. Evenson, D. P. Sperm chromatin structure assay: its clinical use for detecting sperm DNA fragmentation in male infertility and comparisons with other techniques / D. P. Evenson, K. L. Larson, L. K. Jost // *J. Androl.* – 2002. – Vol. 23, N 1. – P. 25–43. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.2002.tb02599.x>
15. Захидов, А. Ю. Биология стволовых клеток зародышевого пути / С. Т. Захидов, А. Ю. Кулибин, Т. Л. Маршак. – М. : МГУ, 2013. – 141 с.
16. Zareen, N. Testicular morphology: effects of mobile phone induced electromagnetic fields on mice testes / N. Zareen // *Profession. Med. J.* – 2009. – Vol. 16, N 2. – P. 289–292.
17. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field / M. Saygin [et al.] // *Toxicol. Ind. Health.* – 2011. – Vol. 27, N 5. – P. 455–463. <https://doi.org/10.1177/0748233710389851>
18. Effects of exposure to electromagnetic field (1.8/0.9GHz) on testicular function and structure in growing rats / H. O Nisbet [et al.] // *Res. Veterinary Sci.* – 2012. – Vol. 93, N 2. – P. 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.10.023>
19. Effect of whole-body 1800 MHz GSM-like microwave exposure on testicular steroidogenesis and histology in mice / Z. Forgács [et al.] // *Reproduct. Toxicol.* – 2006. – Vol. 22, N 1. – P. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2005.12.003>
20. Hinrikus, H. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect / H. Hinrikus, M. Bachmann, J. Lass // *Intern. J. Rad. Biol.* – 2018. – Vol. 94, N 10. – P. 877–882. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1478158>
21. Markov, M. Protect children from EMF / M. Markov, Y. Grigoriev // *Electromagn. Biol. Med.* – 2015. – Vol. 34, N 3. – P. 251–256. <https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1077339>

## References

1. Kudryashov Yu. B., Perov Yu. F., Rubin A. B. *Radiation biophysics: radio frequency and microwave electromagnetic radiation*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 181 p. (in Russian).
2. Grigor'ev Yu. G. From electromagnetic smog to electromagnetic chaos. to evaluating the hazards of mobile communication for health of the population. *Meditsinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost' = Medical Radiology and Radiation Safety*, 2018, vol. 63, no. 3, pp. 28–33 (in Russian).
3. Stozharov A. N. *Medical ecology: studies. Allowance*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
4. 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>
5. IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. *IARC Press Release*, 2011, no. 208. 6 p.
6. Wyde M., Cesta M., Blystone C., Elmore S., Foster P., Hooth M. [et al.] Report of partial findings from the national toxicology program carcinogenesis studies of cell phone radiofrequency radiation in Hsd: Sprague dawley® SD rats (whole body exposure). *BioRxiv*, 2018, 87 p. <https://doi.org/10.1101/055699>
7. Brody S. A. Male infertility and oxidative stress: the role of diet, lifestyle and nutritional supplements. *Andrologiya i genital'naya khirurgiya [Andrology and genital surgery]*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 33–41 (in Russian).
8. Vereshchako G. G. *Influence of electromagnetic radiation of mobile phones on the state of male reproductive system and offspring*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2015. 186 p. (in Russian).
9. Hamada A. J., Singh A., Agarwal A. Cell phones and their impact on male fertility: fact or fiction. *Open Reproductive Science Journal*, 2011, vol. 5, pp. 125–137. <https://doi.org/10.2174/1874255601103010125>
10. Khorseva N. I., Grigor'ev Yu. G., Grigor'ev P. E. The influence of low-intensity electromagnetic fields on the antenatal period of development of the organism. Part 1. From gametogenesis to childbirth (review). *Zhurnal mediko-biologicheskikh issledovaniy [Journal of biomedical research]*, 2017, vol. 5, no. 4, pp. 42–54 (in Russian).
11. 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>
12. Evdokimov V. V., Kodentsova V. M., Vrzhevskaya O. A., Erasova V. I., Yakushina L. M., Kirpatovskii V. I., Sakharov I. Yu. The impact of radiation exposure 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).
13. World Health Organization. *WHO laboratory manual for the examination and processing of human semen*. 5th ed. Geneva, WHO Press, 2010. 271 p.
14. 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. *Journal of Andrology*, 2002, vol. 23, no. 1, pp. 25–43. <https://doi.org/10.1002/j.1939-4640.2002.tb02599.x>
15. Zakhidov S. T., Kulibin A. Yu., Marshak T. L. *Embryonic stem cell biology*. Moscow, Moscow State University Publ., 2013. 141 p. (in Russian).

16. Zareen N. Testicular morphology: effects of mobile phone induced electromagnetic fields on mice testes. *Professional Medical Journal*, 2009, vol. 16, no. 2, pp. 289–292.

17. Saygin M., Caliskan S., Karahan N., Koyu A., Gumral N., Uguz A. Testicular apoptosis and histopathological changes induced by a 2.45 GHz electromagnetic field. *Toxicology and Industrial Health*, 2011, vol. 27, no. 5, pp. 455–463. <https://doi.org/10.1177/0748233710389851>

18. Nisbet H. O., Nisbet C., Akar A., Cevik M., Karayigit M. O. Effects of exposure to electromagnetic field (1.8/0.9GHz) on testicular function and structure in growing rats. *Research in Veterinary Science*, 2012, vol. 93, no. 2, pp. 1001–1005. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2011.10.023>

19. Forgács Z., Somosy Z., Kubinyi G., Bakos J., Hudák A., Surján A., Thuróczy G. Effect of whole-body 1800 MHz GSM-like microwave exposure on testicular steroidogenesis and histology in mice. *Reproductive Toxicology*, 2006, vol. 22, no. 1, pp. 111–117. <https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2005.12.003>

20. Hinrikus H. Bachmann M., Lass J. Understanding physical mechanism of low-level microwave radiation effect. *International Journal of Radiation Biology*, 2018, vol. 94, no. 10, pp. 877–882. <https://doi.org/10.1080/09553002.2018.1478158>

21. Markov M., Grigoriev Y. Protect children from EMF. *Electromagnetic Biology and Medicine*, 2015, vol. 34, no. 3, pp. 251–256. <https://doi.org/10.3109/15368378.2015.1077339>

### Информация об авторах

*Чуешова Наталья Владимировна* – науч. сотрудник. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. 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-т Дзержинского, 83, 220116, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: [patfiz@bsmu.by](mailto:patfiz@bsmu.by)

*Чешик Игорь Анатольевич* – канд. мед. наук, доцент, директор. Институт радиобиологии НАН Беларуси (ул. Федюнинского, 4, 246007, г. Гомель, Республика Беларусь). E-mail: [igor.cheshik@gmail.com](mailto:igor.cheshik@gmail.com)

### Information about the authors

*Natalya V. Chueshova* – 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)

*Frantishek I. Vismont* – Corresponding Member, D. Sc. (Med.), 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)

*Ihar A. Cheshyk* – Ph. D. (Med.), Assistant Professor, Director. Institute of Radiobiology of the National Academy of Sciences of Belarus (4, Fedyninski Str., 246007, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: [igor.cheshik@gmail.com](mailto:igor.cheshik@gmail.com)