

## НЕИОНИЗИРУЮЩИЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

УДК 537.86:57.084.1:599.323.4:591.111.1

### ОТДАЛЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ХРОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ НА ГЕМОПОЭЗ КРЫС

© 2022 г. С. Ю. Перов<sup>1</sup>, В. С. Орлова<sup>2</sup>, Р. З. Лифанова<sup>1,2,\*</sup>, А. А. Кислякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт медицины труда им. акад. Н.Ф. Измерова, Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

\*E-mail: torazo-414@mail.ru

Поступила в редакцию 07.06.2021 г.

После доработки 19.10.2021 г.

Принята к публикации 09.11.2021 г.

Представлены результаты исследований влияния многочастотных электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями подвижной сотовой связи, на гематологические показатели и клеточный состав костного мозга животных. Крыс линии Wistar подвергали воздействию электромагнитных полей с общим ППЭ 250 мкВт/см<sup>2</sup> на частотах 1.8; 2.1; 2.6 ГГц и 3.5; 26; 37 ГГц, и с суммарным ППЭ 500 мкВт/см<sup>2</sup> при 1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 ГГц. Облучение проводили непрерывно в течение 4 мес., материал для исследования отбирали через месяц после прекращения воздействия. Обнаружено достоверное изменение одного из гематологических показателей крови животных, облученных на частотах 1.8; 2.1; 2.6 ГГц при уровне ППЭ 250 мкВт/см<sup>2</sup>. Выявлены статистически значимые изменения в миелограмме костного мозга облученных крыс, а именно повышение относительного контроля процентного содержания палочкоядерных нейтрофилов и лимфоцитов, снижение количества оксифильных эритробластов и моноцитов у крыс после воздействия на частотах 3.5; 26; 37 ГГц при ППЭ 250 мкВт/см<sup>2</sup>, а также и при сумме всех частот, т.е. 1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 ГГц с одинаковой величиной ППЭ 500 мкВт/см<sup>2</sup>. Остальные изменения гематологических показателей и клеточного состава костного мозга облученных животных оставались в пределах физиологической нормы. Обнаруженные изменения могут свидетельствовать о потенциальных отдаленных эффектах хронического воздействия многочастотных электромагнитных полей базовых станций сотовой связи на систему гемопоэза.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, многочастотное электромагнитное поле, базовые станции сотовой связи, гематологические показатели, костный мозг

DOI: 10.31857/S086980312201012X

В последние годы в связи с прогрессирующим увеличением числа базовых станций сотовой и профессиональной подвижной связи, частотно-модулированного телерадиовещания, средств радиолокации и прочих источников электромагнитных полей (ЭМП) особую актуальность приобрела проблема оценки их биологического действия. В настоящее время существует обширная литература, в которой приведены результаты эпидемиологических и экспериментальных исследований биологических эффектов воздействия ЭМП, связанных с коммуникационными и прочими технологиями, в том числе и сотовой связи.

Тем не менее между эпидемиологическими и экспериментальными исследованиями в лабораторных условиях существует принципиальная разница с точки зрения исследуемых электромагнитных сигналов. В реальных условиях большинство населения подвергается воздействию слож-

ной комбинации частот и сигналов различной интенсивности: измерения электромагнитного фона в некоторых крупных европейских городах выявили присутствие ЭМП в диапазоне частот от 100 МГц до 5.5 ГГц [1, 2]. Результаты показали, что облучение населения от сигналов радио- и телевещательных вышек является менее интенсивным, чем от базовых станций сотовой связи (преимущественно 900, 1800, 2100 и 2600 МГц), вклад которых постоянно увеличивается и составляет более 60% от общего воздействия [1–3]. Однако в подавляющем числе экспериментальных исследований, проводимых в лабораторных условиях на животных, как правило, используется одна частота или интенсивность. В связи с этим нельзя не согласиться с недавно высказанным мнением о насущной потребности проведения дополнительных лабораторных медико-биологических исследований, которые более точно воспроизво-

дят реалистичные условия воздействия ЭМП нескольких частот (multiple frequencies) от базовых станций сотовой связи на население [4]. Сравнительные исследования сочетанного воздействия нескольких частот ЭМП показали различия в ключительных биологических эффектах, которые включали как идентичное действие для каждой из частот, так и противоположные результаты [5–7].

Среди исследований воздействия ЭМП на различные биологические функции, такие как пролиферация клеток, экспрессия генов, генотоксические и канцерогенные эффекты, большое значение имеет изучение последствий влияния на систему крови и клетки костного мозга. Выполненный анализ литературных источников показал, что влияние ЭМП на кровь и кроветворение костного мозга изучено недостаточно, поскольку клетки крови и их предшественники качественно и количественно изменяются под воздействием ЭМП [8]. Изучение формирования реакций экспериментальных животных со стороны гемопоэза на такой фактор как ЭМП требует длительный период времени, в том числе и после окончания облучения.

Цель настоящей работы – оценить степень нарушений в системе кроветворения крыс-самцов после хронического воздействия ЭМП нескольких частот по изменению количественных и функциональных показателей клеток крови и костного мозга.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектом исследований послужили 48 половозрелых беспородных крыс-самцов линии Wistar, которые были распределены на четыре группы по 12 животных в каждой, три из которых подверглась хроническому воздействию многочастотного ЭМП. Животных группы 1 облучали на трех частотах 1.8; 2.1; 2.6 ГГц при общей для всех частот величине ППЭ 250 мкВт/см<sup>2</sup>, крысы группы 2 – также на трех частотах 3.5; 26; 37 ГГц и при одинаковой величине ППЭ 250 мкВт/см<sup>2</sup>. Экспозиция животных в группе 3 происходила при сумме всех частот, т.е. 1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 ГГц с одинаковой для всех шести частот величине ППЭ 500 мкВт/см<sup>2</sup>. Облучение проводили круглосуточно в течение 4 мес. с периодическим перерывом на уход за животными, после чего крысы всех групп один месяц находились в аналогичных условиях, но без воздействия ЭМП. Животные во время облучения находились в пластиковых радиопрозрачных клетках коллективного содержания и имели возможность свободного перемещения, а также доступа к корму и воде. Крысы всех групп содержались в условиях с поддерживаемым стандартным световым режимом: 9 ч освещения и 15 ч затемнения. Группа контроля содержалась в

аналогичных с экспериментальными животными условиях за исключением воздействия ЭМП. Спустя месяц после прекращения облучения животных выводили из эксперимента путем декапитации и производили забор проб периферической крови и костного мозга из бедренной кости для проведения анализов. Все работы с животными выполняли в соответствии с требованиями нормативно-правовых актов о порядке экспериментальной работы и гуманном отношении к животным.

Во всех экспериментах для облучения животных использовали стандартное оборудование, создающее ЭМП, аналогичное базовым станциям сотовой связи стандартов GSM, UMTS, LTE и др.

Общий анализ крови проводили на автоматическом гематологическом анализаторе, морфологический состав клеток белой крови определяли путем подсчета лейкоцитов по методу Шиллинга в окрашенных по Романовскому–Гимзе мазках [9]. Цитологическое исследование миелограммы проводили путем подсчета клеток костномозгового пунктата из проксимального отдела бедренной кости крыс по методике Е.А. Кост [10]. Проверку на нормальность распределения данных проводили по критерию Шапиро–Уилка. При статистической обработке данных использовался непараметрический критерий Краскела–Уоллиса с апостериорным попарным сравнением выборок по критерию Данна.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ гематологических показателей крыс групп 1, 2 и 3 спустя месяц после воздействия указывает, что эритроциты, гематокрит и содержание гемоглобина достоверно не изменились по сравнению с группой контроля (табл. 1). Однако у облученных животных в периферической крови отмечается тромбоцитоз, наиболее выраженный в группе 3, в меньшей степени в группе 2 и незначительно отличается от контроля в группе 1. Помимо этого, выявлена тенденция к увеличению количества лейкоцитов, лимфоцитов и гранулоцитов в крови животных всех опытных групп по сравнению с показателями в контрольной группе, которая имеет наибольшее значение у крыс в группе 1.

Оптическая микроскопия показала, что мазки костномозгового пунктата обильно-клеточные, полиморфного состава. Количество бластных клеток не увеличено. При оценке тромбоцитарного ростка в поле зрения наблюдалось до 12 мегакариоцитов разной степени зрелости с отшнуровкой тромбоцитов. Белый росток расширен за счет лимфоцитов. Красный росток соответствовал контрольным значениям. Лейко-эритробластическое отношение было в пределах физиологической нормы. Анализ миелограммы костного

**Таблица 1.** Гематологические показатели периферической крови облученных крыс по сравнению с контрольными животными спустя один месяц после прекращения хронического воздействия ЭМП  
**Table 1.** Hematological parameters of the peripheral blood one month after EMF rats chronic exposure

Форменные элементы крови и гемоглобин	Экспериментальные группы животных			
	группа контроля	группа 1	группа 2	группа 3
		ППЭ 250 мкВт/см <sup>2</sup>		ППЭ 500 мкВт/см <sup>2</sup>
		1.8; 2.1; 2.6 ГГц	3.5; 26; 37 ГГц	1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 ГГц
Эритроциты ( $\times 10^{12}/л$ )	9.36 [9.99; 9.91]	9.70 [9.18; 10.46]	9.72 [9.27; 10.74]	9.76 [9.40; 10.91]
Гематокрит (%)	53.45 [52.35; 56.43]	57.05 [54.28; 60.13]	56.00 [53.98; 60.60]	56.20 [53.90; 61.13]
Гемоглобин (г/л)	172.50 [166.50; 178.75]	180.50 [171.75; 188.50]	174.00 [168.50; 187.25]	176.00 [167.75; 191.75]
Тромбоциты ( $\times 10^9/л$ )	792.00 [701.75; 1109.75]	815.00 [610.25; 1320.50]	1082.00 [854.75; 1300.50]	1160.50 [817.75; 1158.25]
Лейкоциты ( $\times 10^9/л$ )	8.90 [6.05; 10.50]	11.15 [8.60; 12.88]	9.30 [8.50; 11.55]	9.50 [8.33; 10.65]
Лимфоциты ( $\times 10^9/л$ )	5.95 [4.03; 7.43]	7.30 [5.45; 8.73]	6.25 [5.90; 7.88]	6.40 [5.20; 7.20]
Моноциты ( $\times 10^9/л$ )	0.25 [0.20; 0.33]	0.40 [0.30; 0.50]	0.30 [0.30; 0.33]	0.30 [0.28; 0.40]
Гранулоциты ( $\times 10^9/л$ )	2.40 [1.83; 2.70]	3.25* [2.80; 4.03]	2.90 [2.38; 3.23]	2.65 [2.08; 3.25]

\* $p < 0.05$  при сравнении с контролем.

мозга облученных животных показал в группах 2 и 3 статистически значимое повышение относительно контроля процентного содержания палочкоядерных нейтрофилов и лимфоцитов, тогда как в группе 1 не наблюдалось значимых различий (рис. 1). Содержание моноцитов в группе 2 и оксифильных эритробластов в группах 2 и 3 через месяц после завершения экспозиции статистически значимо снижено по сравнению с контролем и группой 2.

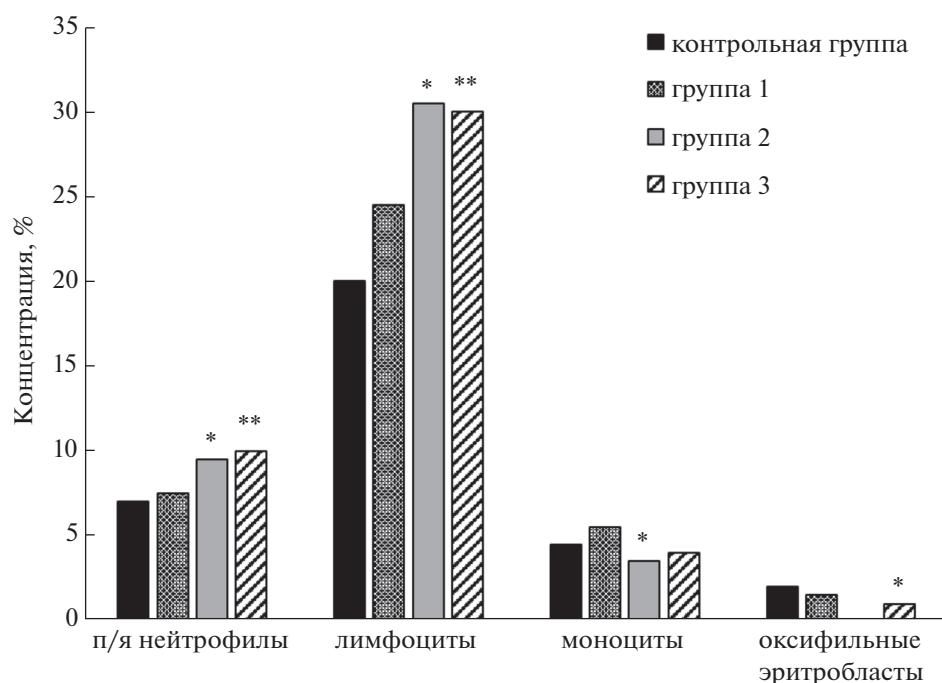
## ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты выполненных исследований позволяют сделать заключение об отсутствии устойчивых эффектов влияния ЭМП с использованными параметрами (частоты и интенсивности) на гемопоэз крыс при хроническом воздействии в течение 4 мес. Представляется вполне правомерным указать на частичное восстановление гемопоэза в костном мозге в течение месяца после устранения потенциально действующего фактора. Полученные результаты позволяют предположить о развитии предрасположенности к повы-

шению свертываемости крови в результате тромбоцитоза при определенном сочетании частот, что в дальнейшем может привести к тромбозам и последующей патологии.

Сходные результаты были получены при изучении влияния облучения в течение одного месяца ЭМП стандарта GSM с частотами 900 и 1800 МГц при величине ППЭ 6 мВт/м<sup>2</sup> на гематологические параметры и гистопатологию костного мозга [11]. Результат анализов крови показывает, что форменные элементы крови (эритроциты, гематокрит, лейкоциты и т.п.) как ложно подвергшихся, так и облученных в течение ЭМП мышей были в пределах нормальных величин показателей животных контрольной группы. Согласно приведенным данным, статистических различий в гематологических показателях между облученными в аналогичных условиях мышами и контрольной группы не отмечалось, за исключением содержания гемоглобина [12].

Исследовано влияние ЭМП 2450 МГц на состав белой крови мышей, которых облучали при средней ППЭ 10 мВт/м<sup>2</sup> на протяжении 60 дней [13].



**Рис. 1.** Миелограмма костного мозга облученных крыс по сравнению с контрольными животными спустя один месяц после прекращения хронического воздействия ЭМП.

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$  при сравнении с контролем.

**Fig. 1.** Myelogram of the bone marrow one month after EMF chronic rat exposure.

\* $p < 0.05$ ; \*\* $p < 0.01$  when compared with the control.

Образцы периферической крови отбирали у облученных и контрольных животных сразу после облучения и на 1-е, 16-е, 32-е и 60-е сутки эксперимента. Результаты показали снижение общего количества лейкоцитов с первого по последний день экспозиции по сравнению с контрольными пробами при незначительном увеличении относительной доли нейтрофилов.

Изучение влияния воздействия на протяжении одного месяца ЭМП частотой 900 МГц на костный мозг, полученный из бедренных костей контрольных и ложно облученных мышей, не выявило различия в количестве ядерных клеток между этими группами [14]. В других исследованиях облучение создаваемого мобильными базовыми станциями ЭМП частотой 900 МГц на протяжении более 2 мес. вызвало изменения в картине крови крыс, выражающиеся в снижении общего количества лейкоцитов, эритроцитов, тромбоцитов и величины гематокрита [15]. Содержание базофильных эритробластов, миелобластов и миелоцитов в костном мозге в подвергнутых воздействию группах значительно увеличилось по сравнению с контрольными группами.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенных исследований позволил установить, что значимое влияние

на гематологические параметры и цитологический состав костного мозга оказывало сочетание действующих частот ЭМП, но не интенсивность воздействия. Экспозиция на более высоких частотах с уровнем в 2 раза ниже для группы облучения на более низких частотах имела схожие тенденции биологического действия ЭМП. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что при гигиенической оценке безопасных уровней воздействия ЭМП представляется важным учитывать не только величины поглощенной энергии, но и частотную структуру воздействия.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Gajšek P., Ravazzani P., Wiart J. et al.* Electromagnetic field exposure assessment in Europe radiofrequency fields (10 MHz–6 GHz) // *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol.* 2015. V. 25. № 1. P. 37–44.
2. *Sagar S., Dongus S., Schoeni A. et al.* Radiofrequency electromagnetic field exposure in everyday microenvironments in Europe: A systematic literature review // *J. Exp. Sci. Environ. Epidemiol.* 2018. V. 28. № 2. P. 147–160.
3. *Chiaramello E., Bonato M., Fiocchi S. et al.* Radio frequency electromagnetic fields exposure assessment in indoor environments: a review // *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 2019. V. 16. № 6. P. 29.
4. *Sienkiewicz Z., Calderón C., Broom K.A. et al.* Are exposures to multiple frequencies the key to future radiofre-

- quency research? // *Front. Publ. Health*. 2017. V. 5. № 328. P. 11.
5. *Tan S., Wang H., Peng R.* A review on combined biological effects of microwave and other physical or chemical agents // *Int. J. Radiat. Res.* 2018. V. 16. № 2. P. 139–153.
  6. *Shirai T., Wang J., Kawabe M. et al.* No adverse effects detected for simultaneous whole-body exposure to multiple-frequency radiofrequency electromagnetic fields for rats in the intrauterine and pre- and post-weaning periods // *J. Radiat. Res.* 2017. V. 58. № 1. P. 48–58.
  7. *Zhu R., Wang H., Xu X. et al.* Effects of 1.5 and 4.3 GHz microwave radiation on cognitive function and hippocampal tissue structure in Wistar rats // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. № 1. P. 1–12.
  8. *Darvishi M., Mashati P., Kandala S. et al.* Electromagnetic radiation: a new charming actor in hematopoiesis? // *Expert Rev. Hematol.* 2021. V. 14. № 1. P. 47–58.
  9. *Соболева Т.Н.* Цитологическое исследование пунктата костного мозга // *Мед. алфавит*. 2011. Т. 4. № 22. С 6–10. [*Soboleva T.N.* Citologicheskoe issledovanie punktata kostnogo mozga // *Medicinskij alfavit*. 2011. V. 4. № 22. P. 6–10. (In Russ.)]
  10. *Карпищенко А.И.* Медицинские лабораторные технологии, руководство. В 2-х т. / Под ред. А.И. Карпищенко. 3-е изд. Т.1. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 472 с. [*Karpishchenko A.I.* Medicinskie laboratornye tekhnologii, rukovodstvo. V 2-h t. / Pod red. A.I. Karpishchenko. 3-e izd. T. 1. M.: GEOTAR-Media, 2012. 472 p. (In Russ.)]
  11. *Usman A.D., Ahmad W.W., Ab Kadir M.Z. et al.* Effect of radiofrequency electromagnetic field exposure on hematological parameters of mice // *World Appl. Sci. J.* 2012. V. 16. № 5. P. 656–664.
  12. *Tohidi F.Z., Fardid R., Rad S.A. et al.* The effect of cell-phone radiation on hematological blood cell factors in BALB/C mice // *Iran. J. Med. Phys.* 2016. V. 13. № 1. P. 58–64.
  13. *Dabo G.I., Songden S.A.* Effect of GSM radiation on white blood cells // *Advances in Life Science and Technology*. 2014. V. 24. P. 130–138.
  14. *Prisco M.G., Nasta F., Rosado M.M. et al.* Effects of GSM-modulated radiofrequency electromagnetic fields on mouse bone marrow cells // *Radiat. Res.* 2008. V. 170. № 6. P. 803–810.
  15. *Jelodar G., Nazifi S., Nuhravesh M.* Effect of electromagnetic field generated by BTS on hematological parameters and cellular composition of bone marrow in rat // *Comp. Clin. Path.* 2011. V. 20. № 6. P. 551–555.

## Electromagnetic Field Chronic Exposure Effects of Cellular Base Stations on Rat Hemopoiesis

**S. Yu. Perov<sup>a</sup>, V. S. Orlova<sup>b</sup>, R. Z. Lifanova<sup>a,b,#</sup>, and A. A. Kislyakova<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Izmerov Research Institute of Occupational, Moscow, Russia*

<sup>b</sup> *Peoples Friendship University of Russia, Moscow, Russia*

<sup>#</sup> *E-mail: torazo-414@mail.ru*

The results the multifrequency electromagnetic field biological effect studies generated by mobile cellular communication base stations on hematological parameters and cellular composition of the bone marrow are presented. Wistar rats were exposed to electromagnetic field with a total power density 250  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  1.8; 2.1; 2.6 GHz and 3.5; 26; 37 GHz, and with a total power density 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  at 1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 GHz. Rats exposure was carried out continuously for 4 months, the biological material was taken one month after the termination of exposure. A significant change was found in one of the hematological parameters of exposed rats at frequencies 1.8; 2.1; 2.6 GHz with power density 250  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Statistically significant changes in the bone marrow myelogram of exposed rats were revealed, namely, an increase percentage of stab neutrophils and lymphocytes, a decrease oxyphilic erythroblasts and monocytes in rats after exposure to frequencies 3.5; 26; 37 GHz with 250  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , as well as with the sum of all frequencies, i.e. 1.8; 2.1; 2.6; 3.5; 26; 37 GHz with 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ . Other changes in hematological parameters and cellular composition of the bone marrow exposed animals remained within the physiological norm. The detected changes may indicate potential long-term effects of chronic exposure to multifrequency electromagnetic fields of base stations of cellular communication on the hematopoietic system.

**Keywords:** electromagnetic field, mobile communication, bone marrow, leukogram