

УДК 57.033; 574.24; 614.875

СОСТОЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРООКСИДАНТНОЙ И АНТИОКСИДАНТНОЙ СИСТЕМ В КРОВИ КРЫС В ПРОЦЕССЕ ХРОНИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ МНОГОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ ОТ СИСТЕМ СОТОВОЙ СВЯЗИ СТАНДАРТОВ GSM, UMTS И LTE

Перов С.Ю., Белая О.В., Кислякова А.А., Левченков Д.И.

ФГБНУ «НИИ медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», Москва, Россия

С развитием технологий сотовой связи все большее внимание уделяется оценке неблагоприятного влияния электромагнитных полей как антропогенного фактора окружающей среды, в частности связанного с процессами образования активных форм кислорода и окислительным стрессом в организме.

Цель исследования - оценка влияния хронического электромагнитного облучения, имитирующего многочастотное воздействие от систем сотовой связи стандартов GSM, UMTS и LTE на состояние отдельных показателей прооксидантного и антиоксидантного баланса в крови крыс.

Материалы и методы. Самцов крыс массой 180-200 г облучали круглосуточно в течение 4 месяцев электромагнитным полем на частотах 1800 МГц, 2100 МГц и 2600 МГц с суммарным уровнем плотности потока энергии ППЭ 250 мкВт/см² (GSM-20%; UMTS-20%; LTE-60%). Забор проб периферической крови проводили после декапитации животных в конце каждого месяца экспозиции в одно и то же время у опытных и контрольных групп животных. В сыворотке крови оценивали содержание кетодиенов и активность каталазы.

Результаты. Обнаружены изменения показателей оксидантной (кетодиены, $p < 0,01$) и антиоксидантной (каталаза) активности в сыворотке крови крыс в условиях длительного многочастотного облучения электромагнитным полем базовых станций сотовой связи, которые имели разнонаправленный характер, отличались в зависимости от срока экспозиции и могли характеризоваться состоянием окислительного стресса. Обнаруженный эффект свидетельствует о нарушении баланса про- и антиоксидантной систем организма в различные сроки хронического воздействия и требует дополнительных исследований с целью определения возможных последствий.

Ключевые слова: электромагнитное поле, многочастотная экспозиция, базовая станция сотовой связи, хроническое облучение, перекисное окисление липидов, прооксидантная активность, антиоксидантная система, кровь.

Для цитирования: Перов С.Ю., Белая О.В., Кислякова А.А., Левченков Д.И. Состояние показателей прооксидантной и антиоксидантной систем в крови крыс в процессе хронического облучения многочастотным электромагнитным полем от систем сотовой связи стандартов GSM, UMTS и LTE. Медицина труда и экология человека. 2023;1:139-150.

Для корреспонденции: Перов Сергей Юрьевич, д.б.н., ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», заведующий лабораторией электромагнитных полей, e-mail: perov@irioh.ru.

Финансирование: исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2023-10111>

PROOXIDANT AND ANTIOXIDANT STATUS IN RAT BLOOD UNDER CHRONIC MULTIFREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELD EXPOSURE OF GSM, UMTS AND LTE MOBILE SYSTEMS

Perov S. Yu., Belaya O. V., Kisljakova A.A., Levchenkov D. I.

Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russia

Introduction. Due to mobile telecommunications development the increasing attention is placed on adverse effects from electromagnetic fields as an anthropogenic environmental factor, which associated in particular with active oxygen species formation and oxidative stress.

The aim of the study was to assess the effect of chronic electromagnetic exposure, simulated multi-frequency exposure from GSM, UMTS and LTE mobile systems, on the state of partial parameters of the pro-oxidant and antioxidant balance in the rat blood.

Materials and methods. Male rats weighing 180-200 g were exposed to electromagnetic field of 1800 MHz, 2100 MHz and 2600 MHz with a total power density level at 250 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (GSM-20%; UMTS-20%; LTE-60%) for 4 months around the clock. Peripheral blood sampling was carried out after decapitation of animals at the end of each exposure month at the same time in the experimental and sham-exposed groups. Serum levels of ketodienes and catalase activity were assessed.

Results. Changes of oxidant (ketodienes, $p < 0.01$) and antioxidant (catalase) activity in the blood serum of rats long-term exposed to multi-frequency mobile base station electromagnetic field had a multidirectional response, differed depending on the exposure time and could be characterized by an oxidative stress. The observed effect indicates the pro- and antioxidant systems imbalance at various times of chronic exposure and requires additional studies to determine the possible consequences.

Keywords: electromagnetic field, multifrequency exposure, mobile base station, chronic exposure, lipid peroxidation, pro-oxidant activity, antioxidant system, blood.

Citation: Perov S. Yu., Belaya O. V., Kisljakova A.A., Levchenkov D. I. Prooxidant and antioxidant status in rat blood under chronic multifrequency electromagnetic field exposure of GSM, UMTS and LTE mobile systems. *Occupational health and human ecology*. 2023;1:139-150.

Correspondence: Sergey Yu. Perov, Doctor of Biology, FSBSI "Izmerov Research Institute of Occupational Health", Head of Electromagnetic field laboratory, e-mail: perov@irioh.ru.

Financing: the study had no financial support.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2023-10111>

Введение. Электромагнитное излучение в окружающей среде – экологический фактор, в формирование которого наиболее весомый вклад в настоящее время вносят различные системы телекоммуникаций, в основном сотовой связи [1, 2]. По данным Ассоциации GSMA [3], к концу 2021 года число уникальных пользователей мобильной связи в мире составило 5,3 млрд человек, а к 2025 году ожидается увеличение этого показателя на 400 млн новых абонентов. По мере развития и внедрения беспроводных технологий, помимо неуклонного роста общего количества систем сотовой связи в среде обитания человека, можно отметить крайнюю неоднородность распределения используемых стандартов и поколений в различных регионах. Так, в настоящее время наиболее распространенными являются системы поколения 4G и 3G, на которые в странах СНГ приходится 49% и 34% сетей сотовой связи, а в странах Европы – 75% и 15% соответственно. Однако по прогнозам в 2025 году их соотношение изменится и составит 70% и 17% для СНГ, 51% и 5% – для Европы [3]. Подобные изменения структуры распределения сетей различных стандартов являются закономерными при технологическом развитии отрасли радиосвязи и, в свою очередь, отражаются на формировании электромагнитной обстановки на соответствующей территории, в особенности на амплитудно-частотных характеристиках электромагнитных полей (ЭМП) [4].

В недалеком прошлом основное внимание было обращено на экологическую опасность ионизирующей радиации, в сравнительно меньшей степени – на возможное неблагоприятное влияние электромагнитных излучений, являющихся неионизирующими по своей природе и отличающихся физическим механизмом действия на биологические системы [5]. Однако подобное отношение к неионизирующему фактору изменилось вследствие данных многочисленных экспериментальных и теоретических исследований биологических эффектов воздействия ЭМП, причем в особенности антропогенного происхождения. Опрос, проведенный среди 300 специалистов в области медико-биологических проблем электромагнитных излучений, выявил наиболее важные отправные точки в возможном отрицательном действии на окружающую среду и, как следствие, на здоровье человека – окислительный стресс, когнитивные нарушения, неблагоприятные исходы беременности и развитие онкологических заболеваний [6].

Окислительно-восстановительные реакции лежат в основе многих метаболических процессов в организме, среди которых особую роль играют свободнорадикальные реакции, инициирующие образование перекисных соединений в тканях и органах [7]. Окислительный стресс представляет собой нарушение баланса между прооксидантной и антиоксидантной системами, что приводит к окислительному повреждению белков, аминокислот и, особенно, липидов, которое тесно связано с повышением уровня активных форм кислорода [8]. В последнее время повысился интерес к окислительному стрессу, поскольку электромагнитные излучения стали рассматриваться как фактор, связанный с образованием активных форм кислорода и способный нарушить равновесие между активностью прооксидантной и антиоксидантной систем в организме [9, 10]. В соответствии с этим изучение процессов липидной перекисидации позволяет оценить уровень окислительного

стресса, степень его повреждающего действия и влияния на состояние организма в целом. В качестве показателей прооксидантной активности используются уровни первичных (диеновые конъюгаты) и вторичных (кетодиены) продуктов перекисидации липидов. Диеновые конъюгаты как первичные продукты окисления липидов отличаются нестойкостью, в то время как кетодиены являются более информативными показателями, поскольку способны накапливаться и оказывать влияние на функциональную активность клеток, нарушать стабильность мембран и способствовать деструкции клеток [11]. Система антиоксидантной защиты противостоит избыточной интенсивности окислительных процессов и оценивается по активности антиоксидантных ферментов, таких как каталаза, которые способны тормозить или снижать уровень свободнорадикального окисления.

Представленные выше данные анализа литературных источников позволяют сформулировать **цель** исследований, которая заключалась в оценке влияния хронического электромагнитного облучения, имитирующего многочастотное воздействие от систем сотовой связи стандартов GSM, UMTS и LTE на состояние отдельных показателей прооксидантного и антиоксидантного баланса в крови крыс.

Материалы и методы. Объектами исследований являлись 96 белых крыс-самцов линии Wistar с массой на начало эксперимента 180-200 г. Все манипуляции с животными проводились в соответствии с международными требованиями к проведению работ с экспериментальными животными на основе принципов гуманности, которые изложены в директивах Европейского сообщества (86/609/ECC), Хельсинкской декларации и одобрены локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ». Животные содержались в стандартных условиях вивария в контролируемых условиях окружающей среды (18-20°C, относительная влажность воздуха 30-70%). Световой комбинированный (естественный/искусственный) режим составлял 12 часов в сутки, крысы в течение всего эксперимента имели доступ к воде и корму *ad libitum*. Все животные были случайным образом разделены поровну, где каждая половина была дополнительно подразделена на 4 группы по 12 особей в каждой. В процессе экспозиции радиопрозрачные клетки с крысами (по 6 в каждой) размещались на деревянных стеллажах в зоне облучения на расстоянии 3 метров от антенн источников ЭМП.

В лабораторном стенде в процессе облучения животных создавалась имитация режимов работы базовых станций сотовой связи действующих стандартов – GSM (2G), UMTS (3G) и LTE FDD (4G) с центральными частотами 1800 МГц, 2100 МГц и 2600 МГц. Все экспериментальные группы находились в одинаковых условиях облучения ЭМП с суммарным уровнем плотности потока энергии (ППЭ) 250 мкВт/см² (GSM-20%; UMTS-20%; LTE-60%). Параллельный контроль находился в отдельном помещении в идентичных условиях, но без воздействия ЭМП. Контроль величин ППЭ в зоне облучения животных ЭМП проводился с помощью измерителей Narda NBM-550 (Narda AG, Германия) и Narda SRM-3006 (Narda AG, Германия).

Облучение проводилось круглосуточно в течение 4 месяцев и по окончании каждого месяца экспозиции осуществлялся забор проб периферической крови животных опытной и контрольной групп путем декапитации. Содержание кетодиенов в сыворотке крови определяли спектрофлуориметрическим методом по коэффициентам экстинкции (εM, мл-

1×см-1) в максимумах поглощения против холостой пробы 233 нм ($\epsilon_M = 23200$), в гексановом экстракте по отношению к контрольному образцу на спектрофотометре Cary-50 (Varian, США) [12]. Активность каталазы оценивали с помощью метода, основанного на способности перекиси водорода образовывать с солями молибдена стойкий окрашенный комплекс [13].

Статистическая обработка данных проводилась в среде R version 4.1.2 с применением теста Шапиро-Уилка, критерия Краскела-Уоллиса и критерия Манна-Уитни. Оценка воздействия ЭМП на животных проводилась путем сравнения показателей опытных групп с аналогичными показателями параллельных контрольных групп спустя 1, 2, 3 и 4 месяца круглосуточного облучения животных. Различия принимали статически достоверными при уровне значимости ($p < 0,05$). Количественные показатели приводятся в виде медианы и интерквартильного размаха.

Результаты. Показатели липидной пероксидации (кетодиены и каталаза) в сыворотке крови крыс в процессе 4-месячного облучения изменялись в зависимости от времени экспозиции, имели разнонаправленный характер и отличались от аналогичных показателей у контрольной группы животных, как представлено в таблице.

Таблица

Показатели липидной пероксидации в сыворотке крови крыс

Table

Indicators of lipid peroxidation in the blood serum of rats

Группа животных	Месяц облучения	Концентрация кетодиенов, пмоль/л	Концентрация каталазы, ммоль/л
Контроль	1	242,76 [217,89; 276,65]	8,89 [8,07; 9,29]
	2	204,27 [131,57; 263,70]	8,21 [6,47; 9,50]
	3	185,06 [158,80; 266,07]	8,83 [8,06; 9,92]
	4	162,17 [139,42; 194,86]	8,27 [6,87; 9,27]
Опыт	1	192,49 [172,71; 228,22]**	9,53 [9,13; 10,52]
	2	326,99 [295,44; 359,26]**	8,29 [7,51; 9,81]
	3	81,72 [62,16; 135,21]	8,95 [8,01; 11,07]
	4	174,16 [139,10; 183,15]	7,86 [7,07; 8,25]

Примечание: ** - $p < 0,01$ относительно контрольной группы

В первый месяц эксперимента уровень кетодиенов в сыворотке крови облученных ЭМП крыс достоверно снизился ($p < 0,01$) и составил 192,49 [172,71; 228,22] пмоль/л по

сравнению с уровнем в группе контроля, достигавшим величины 242,76 [217,89; 276,65] пмоль/л (рис. 1). Продолжение облучения животных опытной группы привело к противоположному результату – резкому достоверному ($p < 0,01$) повышению концентрации кетодиенов до 326,99 [295,44; 359,26] пмоль/л по сравнению с группой мнимого облучения, у которой наблюдалось незначительное снижение уровня до 204,27 [131,57; 263,70] пмоль/л. Однако дальнейшее воздействие ЭМП способствовало интенсивному достоверному ($p < 0,01$) снижению уровня кетодиенов в сыворотке облученных крыс – вплоть до 81,72 [62,16; 135,21] пмоль/л, который также несколько понизился до 185,06 [158,80; 266,07] пмоль/л и у контрольных животных. В последний четвертый месяц экспозиции содержание кетодиенов в сыворотке крови крыс облученной и контрольной групп практически сравнялось: опыт – 174,16 [139,10; 183,15] пмоль/л, контроль – 162,17 [139,42; 194,86] пмоль/л.

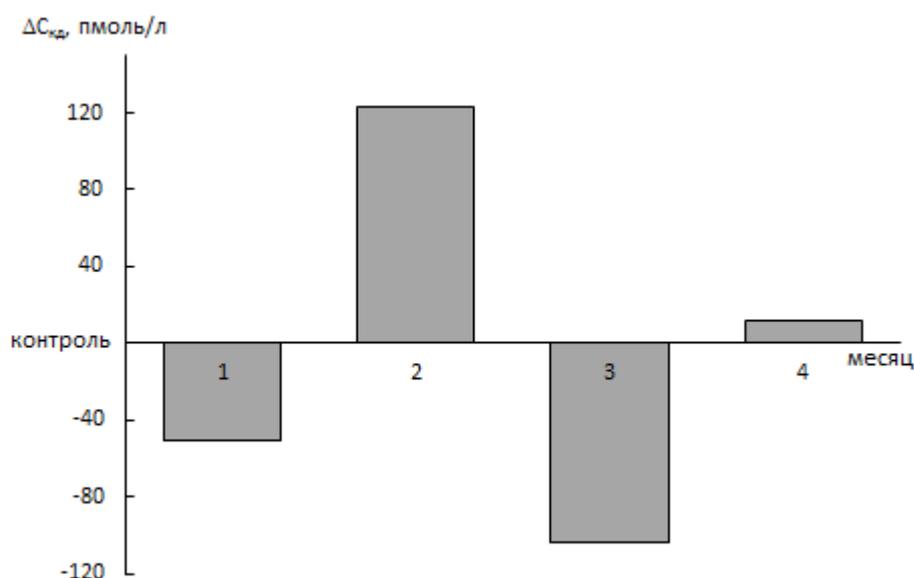


Рис. 1. Разница концентраций кетодиенов в сыворотке крови крыс опытной и контрольной групп, в пмоль/л

Figure 1. The difference between the concentrations of ketodienes in the blood serum of rats from the experimental and control groups, in pmol/l

Динамика активности каталазы на фоне изменений уровня кетодиенов в сыворотке крови облученных крыс демонстрировала противоположную направленность (рис. 2). Увеличение уровня активности каталазы в крови облученных ЭМП крыс до 9,53 [9,13; 10,52] ммоль/л по сравнению с уровнем в группе мнимого облучения, равного 8,89 [8,07; 9,29] ммоль/л, наблюдалось в первый месяц экспозиции. В то же время уровень активности каталазы у крыс после облучения в последующие второй и третий месяцы эксперимента незначительно варьировался от 8,29 [7,51; 9,81] ммоль/л до 8,95 [8,01; 11,07] ммоль/л, а у животных контрольной группы – от 8,21 [6,47; 9,50] ммоль/л до 8,83 [8,06; 9,92] ммоль/л. После четырех месяцев облучения снижение активности каталазы до 7,86 [7,07; 8,25]

ммоль/л отмечено у облученных крыс при относительно неизменном уровне у контрольных животных в 8,27 [6,87; 9,27] ммоль/л.

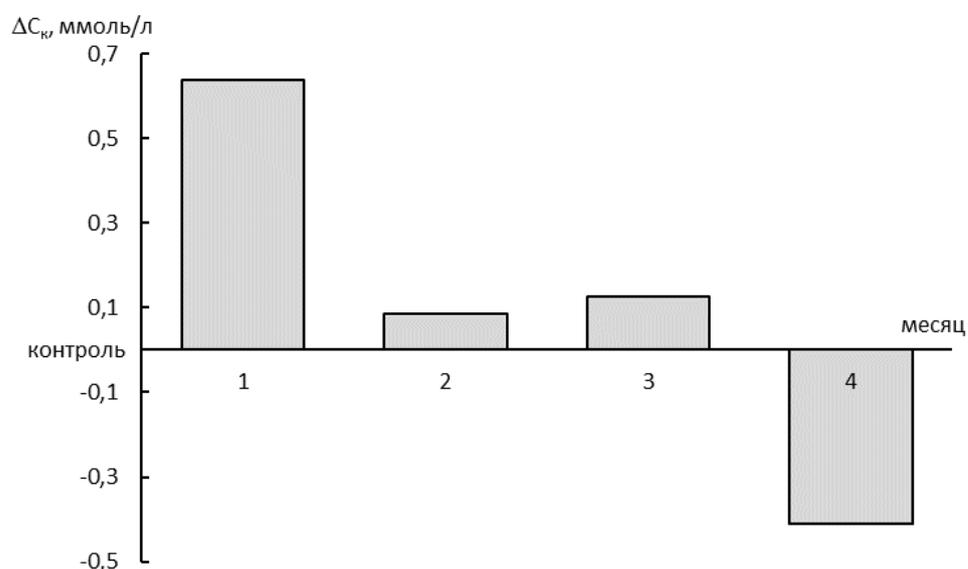


Рис. 2. Разница концентраций каталазы в сыворотке крови крыс опытной и контрольной групп, в ммоль/л

Figure 2. The difference in catalase concentrations in the blood serum of rats of the experimental and control groups, mmol/l

Обсуждение. Полученные экспериментальные данные можно объяснить с позиций соответствия принципам антиоксидантной защиты, в которых изменение содержания одного из компонентов может привести к дисбалансу или недостаточной активности всей системы с последующим нарушением регуляции процессов свободнорадикального окисления [14]. Результаты оценки показателей системы прооксиданты/антиоксиданты в крови животных в условиях хронического воздействия ЭМП в наших исследованиях показали, что обнаруженные достоверные изменения связаны с различной длительностью воздействия ЭМП, имитирующих режимы работы базовых станций сотовой связи действующих стандартов. ЭМП низких интенсивностей в настоящее время рассматриваются как фактор, вызывающий окислительные процессы, а окислительный стресс, индуцированный электромагнитным воздействием, представляется как один из первичных механизмов биологического действия фактора [15, 16]. Полученные данные хронического эксперимента согласуются с результатами ряда исследований в условиях *in vivo* [17-20] и *in vitro* [21], свидетельствующих о нарушении равновесия про- и антиоксидантного баланса при электромагнитном воздействии со сходными частотными параметрами, но меньшей интенсивности и различной длительности.

Результаты исследования хронического облучения животных показали, что воздействие ЭМП на отдельных частотах стандартов сотовой связи 900 МГц, 1800 МГц и 2100 МГц (по 2 ч/сутки, 6 месяцев, при соответствующих величинах удельного поглощения в тканях головного мозга 0,0845 Вт/кг, 0,04563 Вт/кг и 0,03957 Вт/кг) вызывало изменения

общего про- и антиоксидантного статуса в опытной группе по сравнению с необлученной группой в сторону усиления окисления липидов и повышения образования окислительных повреждений в тканях головного мозга крыс [17]. В серии экспериментальных исследований, выполненных на мышах, которые подвергались воздействию ЭМП частотой 1800 МГц при величине ППЭ $37,54 \pm 1,01$ мВт/м² по 12 и 24 часа в течение 45 дней, было обнаружено значительное увеличение содержания в головном мозге животных малонового диальдегида – одного из показателей оксидации липидов при значительном снижении ряда показателей антиоксидантной активности [18]. В исследованиях влияния хронического облучения ЭМП стандарта GSM 1800 МГц (уровень $E = 6,8 \pm 0,1$ В/м, 2ч/день, 8 недель) у крыс опытной группы по сравнению с контрольной наблюдалось значительное повышение уровней показателей окислительного стресса (малонового диальдегида и оксида азота) и значительное снижение показателей антиоксидантной защиты (супероксиддисмутазы, каталазы и восстановленного глутатиона) в тканях печени, почек и головного мозга [19].

Данные исследования антиоксидантного статуса плазмы крови людей, проживающих более 5 лет вблизи базовых станций сотовой связи стандартов GSM 900/1800 в условиях воздействия ЭМП с уровнями ППЭ $5,002 \pm 0,182$ мВт/м², показали значительное снижение показателей антиоксидантной защиты (концентрации глутатиона, активности каталазы и супероксиддисмутазы) и значительное увеличение показателей перекисного окисления липидов по сравнению с группой контроля [20].

В результате однократного 30-минутного облучения ЭМП с частотой 1,8 ГГц в культивируемых клетках человека HEK293 обнаружено повышение образования активных форм кислорода, которое сопровождалось изменением экспрессии генов как антиоксидантных, так и окислительных показателей [21]. Подобные изменения в прооксидантных и антиоксидантных системах, подтверждающие полученные результаты экспериментальных исследований, можно рассматривать как состояние окислительного стресса при воздействии ЭМП радиочастотного спектра, которое характеризуется избыточным образованием активных форм кислорода, о чем свидетельствует усиление перекисного окисления липидов и снижение уровня и активности антиоксидантов.

Заключение. Изучение показателей оксидантного и антиоксидантного баланса в крови животных в процессе хронического многочастотного облучения ЭМП, создаваемого передающими радиотехническими объектами действующих стандартов сотовой связи (GSM, UMTS и LTE), при общей величине ППЭ 250 мкВт/см² выявило нарушение регуляции процессов свободнорадикального окисления по отдельным показателям. Обнаруженный эффект нестабильности баланса между прооксидантной/антиоксидантной активностью в сыворотке крови крыс в различные сроки длительного многочастотного облучения ЭМП, по-видимому, связан с избыточным образованием активных форм кислорода в результате электромагнитного воздействия. Электромагнитный фактор антропогенного происхождения в последнее время рассматривается как специфический вид загрязнения окружающей среды, причем, если эти проблемы традиционно являлись санитарно-гигиеническими, то в настоящее время стали частью общей экологической проблемы. В связи с полученными результатами при оценке безопасных уровней воздействия ЭМП на окружающую среду

необходимо учитывать обнаруженный эффект – способность вызывать дисбаланс про- и антиоксидантных процессов в организме.

Список литературы:

1. Veyret B., Perrin A. Wireless communications and radiofrequency fields. In: *Electromagnetic Fields, Environment and Health.* / A. Perrin, M. Souques eds. Paris: Springer-Verlag France; 2012. p.63-79.
2. Gajšek P. Public exposure to radio frequency electromagnetic fields. In: *Mobile Communications and Public Health* / M.S. Markov ed. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group LLC; 2019. p.47-63.
3. The Mobile Economy 2022. URL: <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/02/280222-The-Mobile-Economy-2022.pdf> (дата обращения 20.12.2022).
4. Ndiaye M. D. B. L., Noé N., Combeau P., Gaudaire F., Pousset Y. Analysis of electromagnetic waves spatio-temporal variability in the context of exposure to mobile telephony base station. *Progress in Electromagnetic Research C.* 2018; 88: 179-194.
5. Georgiou C.D., Kalaitzopoulou E., Skipitari M., Papadea P., Varemменou A., Gavriil V., et al. Physical differences between man-made and cosmic microwave electromagnetic radiation and their exposure limits, and radiofrequencies as generators of biotoxic free radicals. *Radiation.* 2022; 2(4): 285-302.
6. Verbeek J., Oftedal G., Feychting M., van Rongen E., Scarfi M.R., Mann S., et al. Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environ Int.* 2021; 146: 106300.
7. Меньщикова Е.Б., Ланкин В.З., Зенков Н.К., Бондарь И.А., Круговых Н.Ф., Труфакин В.А. Окислительный стресс. Проксиданты и антиоксиданты. М.: Слово; 2006.
8. Мартинович Г.Г. Активные формы кислорода в регуляции функций и свойств клеток: явления и механизмы. Минск: БГУ; 2021.
9. Yakymenko I., Sidorik E., Henschel D., Kyrylenko S. Low intensity radiofrequency radiation: a new oxidant for living cells. *Oxid Antioxid Med Sci.* 2014; 3(1): 1-3.
10. Henschenmacher B., Bitsch A., de Las Heras Gala T., Forman H.J., Fragoulis A., Ghezzi P., et al. The effect of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A protocol for a systematic review. *Environ Int.* 2022 Jan; 158:106932.
11. Колесникова Л.И., Даренская М.А., Колесников С.И. Свободнорадикальное окисление: взгляд патофизиолога. *Бюллетень сибирской медицины.* 2017; 16 (4): 16-29.
12. Pompella A., Maellaro E., Casini A.F., Ferrari M., Ciccoli L., Comporti M. Measurement of lipid peroxidation in vivo: a comparison of different procedures. *Lipids.* 1987; 22 (3): 206-211.
13. Королюк М.А., Иванова Л.И., Майорова И.Г., Токарев В.Е. Метод определения активности каталазы. *Лаб дело.* 1988; 1: 16-19.

14. Сазонтова Т.Г., Архипенко Ю.В. Значение баланса прооксидантов и антиоксидантов – равнозначных участников метаболизма. Патологическая физиология и экспериментальная терапия. 2007; 3: 2-18.
15. Yakymenko I., Tsybulin O., Sidorik E., Henshel D., Kyrylenko O., Kyrylenko S. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med*. 2016; 35 (2): 186-202.
16. Kivrak E.G., Yurt K.K., Kaplan A.A., Alkan I., Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J Microsc Ultrastruct*. 2017 Oct-Dec; 5(4):167-176.
17. Alkis M.E., Bilgin H.M., Akpolat V., Dasdag, S., Yegin, K., Yavas, M.C., et al. Effect of 900-, 1800-, and 2100-MHz radiofrequency radiation on DNA and oxidative stress in brain. *Electromagn Biol Med* 2019; 38 (1): 32-47.
18. Zosangzuali M., Lalremruati M., Lalmuansangi C., Nghakliana F., Pachuau L., Bandara P. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation emitted from a mobile phone base station on the redox homeostasis in different organs of Swiss albino mice. *Electromagn Biol Med*. 2021; 40 (3): 393-407.
19. Berköz M., Arslan B., Yıldırım M., Aras N., Yalın S., Çömelekoğlu Ü. 1800 MHz radio-frequency electromagnetic radiation induces oxidative stress in rat liver, kidney and brain tissues. *Eastern J Med*. 2018; 23(2): 71-78.
20. Zothansiam, Zosangzuali M., Lalramdinpuii M., Jagetia G.C. Impact of radiofrequency radiation on DNA damage and antioxidants in peripheral blood lymphocytes of humans residing in the vicinity of mobile phone base stations. *Electromagn Biol Med*. 2017; 36 (3): 295-305.
21. Pooam M., Jourdan N., Aguida B., Dahon C., Baouz S., Terry C., et al. Exposure to 1.8 GHz radiofrequency field modulates ROS in human HEK293 cells as a function of signal amplitude. *Commun Integr Biol*. 2022; 15 (1): 54-66.

References:

1. Veyret B., Perrin A. Wireless communications and radiofrequency fields. In: *Electromagnetic Fields, Environment and Health* / A. Perrin, M. Souques eds. Paris: Springer-Verlag France; 2012. p.63-79.
2. Gajšek P. Public exposure to radio frequency electromagnetic fields. In: *Mobile Communications and Public Health* / M.S. Markov ed. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group LLC; 2019. p.47-63.
3. The Mobile Economy 2022. URL: <https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2022/02/280222-The-Mobile-Economy-2022.pdf>. (accessed 20.12.2022)
4. Ndiaye M. D. B. L., Noé N., Combeau P., Gaudaire F., Pousset Y. Analysis of electromagnetic waves spatio-temporal variability in the context of exposure to mobile telephony base station. *Progress in Electromagnetic Research C*. 2018; 88: 179-194.
5. Georgiou C.D., Kalaitzopoulou E., Skipitari M., Papadea P., Varemменou A., Gavriil V., et al. Physical differences between man-made and cosmic microwave electromagnetic radiation

- and their exposure limits, and radiofrequencies as generators of biotoxic free radicals. *Radiation*. 2022; 2(4): 285-302.
6. Verbeek J., Oftedal G., Feychting M., van Rongen E., Scarfi M.R., Mann S., et al. Prioritizing health outcomes when assessing the effects of exposure to radiofrequency electromagnetic fields: A survey among experts. *Environ Int*. 2021; 146: 106300.
 7. Men'shnikova E.B., Lankin V.Z., Zenkov N.K., Bondar' I.A., Krugovyh N.F., Trufakin V.A. Okislitel'nyj stress. *Prooksidanty i antioksidanty*. M.: Slovo; 2006. (In Russian)
 8. Martinovich G.G. Aktivnye formy kisloroda v reguljacii funkcij i svojstv kletok: javlenija i mehanizmy. Minsk: BGU; 2021. (In Russian)
 9. Yakymenko I., Sidorik E., Henschel D., Kyrylenko S. Low intensity radiofrequency radiation: a new oxidant for living cells. *Oxid Antioxid Med Sci*. 2014; 3(1): 1-3.
 10. Henschenmacher B., Bitsch A., de Las Heras Gala T., Forman H.J., Fragoulis A., Ghezzi P., et al. The effect of radiofrequency electromagnetic fields (RF-EMF) on biomarkers of oxidative stress in vivo and in vitro: A protocol for a systematic review. *Environ Int*. 2022 Jan; 158:106932.
 11. Kolesnikova L.I., Darenskaya M.A., Kolesnikov S.I. Free radical oxidation: a pathophysiolgists' view. *Bulleten Sibirskoy Meditsiny*. 2017; 16 (4): 16-29. (In Russian)
 12. Pompella A., Maellaro E., Casini A.F., Ferrari M., Ciccoli L., Comporti M. Measurement of lipid peroxidation in vivo: a comparison of different procedures. *Lipids*. 1987; 22 (3): 206-211.
 13. Koroljuk M.A., Ivanova L.I., Majorova I.G., Tokarev V.E. Metod opredelenija aktivnosti katalazy. *Lab delo*. 1988; 1: 16-19. (In Russian)
 14. Sazontova T.G., Arhipenko Ju.V. Znachenie balansa prooksidantov i antioksidantov – ravnoznachnyh uchastnikov metabolizma. *Patologich fiziol jeksperim terapija*. 2007; 3: 2-18. (In Russian)
 15. Yakymenko I., Tsybulin O., Sidorik E., Henschel D., Kyrylenko O., Kyrylenko S. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagn Biol Med*. 2016; 35 (2): 186-202.
 16. Kivrak E.G., Yurt K.K., Kaplan A.A., Alkan I., Altun G. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J Microsc Ultrastruct*. 2017 Oct-Dec; 5(4):167-176.
 17. Alkis M.E., Bilgin H.M., Akpolat V., Dasdag, S., Yegin, K., Yavas, M.C., et al. Effect of 900-, 1800-, and 2100-MHz radiofrequency radiation on DNA and oxidative stress in brain. *Electromagn Biol Med* 2019; 38 (1): 32-47.
 18. Zosangzuali M., Lalremruati M., Lalmuansangi C., Nghakliana F., Pachuau L., Bandara P. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation emitted from a mobile phone base station on the redox homeostasis in different organs of Swiss albino mice. *Electromagn Biol Med*. 2021; 40 (3): 393-407.
 19. Berköz M., Arslan B., Yıldırım M., Aras N., Yalın S., Çömelekoğlu Ü. 1800 MHz radio-frequency electromagnetic radiation induces oxidative stress in rat liver, kidney and brain tissues. *Eastern J Med*. 2018; 23(2): 71-78.
 20. Zothansiyama, Zosangzuali M., Lalramdinpuii M., Jagetia G.C. Impact of radiofrequency radiation on DNA damage and antioxidants in peripheral blood lymphocytes of humans

residing in the vicinity of mobile phone base stations. *Electromagn Biol Med.* 2017; 36 (3): 295-305.

21. Pooam M., Jourdan N., Aguida B., Dahon C., Baouz S., Terry C., et al. Exposure to 1.8 GHz radiofrequency field modulates ROS in human HEK293 cells as a function of signal amplitude. *Commun Integr Biol.* 2022; 15 (1): 54-66.

Поступила/Received: 27.12.2022

Принята в печать/Accepted: 16.02.2023