

УДК 57.045

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАРБОНИЛЬНОГО СТРЕССА ПРИ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ СТАНДАРТОВ СОТОВОЙ СВЯЗИ

Перов С.Ю.¹, Орлова В.С.², Лифанова Р.З.^{1,2}, Кислякова А.А.¹

¹ФГБНУ «НИИ медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов, Москва, Россия

В условиях развития систем беспроводных коммуникаций электромагнитное поле (ЭМП) радиочастотного диапазона превратилось в значимый экологический физический фактор для здоровья населения.

Цель исследований: изучение показателей карбонильного стресса в крови самцов и самок крыс в условиях подострой многочастотной электромагнитной экспозиции, создаваемой базовыми станциями систем сотовой связи.

Объектом исследований являлись самцы и самки крыс линии Wistar, которые подвергались круглосуточному 30-дневному облучению ЭМП с уровнем облучения 500 мкВт/см² стандартов 5 G (3,5; 28; 37 ГГц) и 2-4 G (1,8; 2,1; 2,6 ГГц) с параллельным контролем (мнимое воздействие). Показатели карбонильного стресса в крови животных определялись на 30 день облучения и на 30 день последствия.

Результаты. В крови самцов крыс при воздействии ЭМП, соответствующего стандартам 2-4 G, как и по группе в целом, после 30 дней экспозиции отмечались статистически достоверные изменения содержания карбонильных соединений; эффект сохранялся через 30 дней после прекращения воздействия, он также наблюдался в крови самок в тот же период последствия. Активность каталазы, независимо от пола, имела тенденцию к повышению в группе животных, при экспозиции ЭМП в соответствии со стандартом 5 G.

Заключение. Результаты исследования указывают на нарушение равновесия концентраций прооксидантных и антиоксидантных компонентов, что является следствием активации процессов окисления при многочастотной электромагнитной экспозиции.

Ключевые слова: электромагнитное поле, сотовая связь, каталаза, карбонильный стресс, антиоксидантная защита.

Для цитирования: Перов С.Ю., Орлова В.С., Лифанова Р.З., Кислякова А.А. Сравнительный анализ показателей карбонильного стресса при действии электромагнитных полей различных стандартов сотовой связи. Медицина труда и экология человека. 2023; 2:157-165.

Для корреспонденции: Лифанова Раъно Зобидовна, Департамент экологической безопасности и менеджмента качества продукции, Институт экологии, Российский университет дружбы народов, аспирант кафедры системной экологии; младший научный

сотрудник ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда имени академика Н.Ф. Измерова», e-mail: torazo-414@mail.ru.

Финансирование: Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: Авторы данной статьи сообщают об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2023-10211>

COMPARATIVE ANALYSIS OF CARBONYL STRESS INDICATORS OF ELECTROMAGNETIC FIELD EXPOSURE OF VARIOUS CELLULAR COMMUNICATION STANDARDS

S. Yu. Perov¹, V. S. Orlova², R. Z. Lifanova^{1,2}, A. A. Kislyakova¹

¹Izmerov Research Institute of Occupational Health, Moscow, Russia,

^{1,2}Russian Peoples' Friendship University, Moscow, Russia

According to wireless communication extension, the radiofrequency electromagnetic field (EMF) has become a significant ecological physical factor for general public.

The goal of investigations was the carbonyl stress indicators in the blood of male and female rat subacute multi-frequency electromagnetic field exposure from cellular base stations.

The research objects were 72 Wistar line rats (males and females). The rats had been round-the-clock 30-day 500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ EMF exposure of 5G (3,5; 28; 37 GHz) and 2-4 G (1,8; 2,1; 2,6 GHz) with parallel control (sham exposure). The carbonyl stress indicators in the blood of animals were evaluated after 30th day of exposure and after 30th day as aftereffect.

Results. In the blood of male rats exposed 2-4 G EMF, as well as in the group as a whole, after 30 days of exposure, carbonyl form concentration were significant changes. This effect had shown 30 days after the end of exposure. It was observed in the blood of female rats in the same period of aftereffect too. Catalase concentration, regardless of gender, tended to increase in the group of 5 G EMF exposed.

Conclusion. The research results indicate an imbalance in the concentrations of prooxidant and antioxidant components, which is a consequence of the activation of oxidation processes during multifrequency electromagnetic exposure.

Keywords: electromagnetic field, cellular communication, catalase, carbonyl stress, antioxidant protection

Citation: S. Yu. Perov, V. S. Orlova, R. Z. Lifanova, A. A. Kislyakova. Comparative analysis of carbonyl stress indicators of electromagnetic field exposure of various cellular communication standards. *Occupational Health and Human Ecology*. 2023;2:157-165.

For correspondence: Rano Z. Lifanova, Department of Ecological Safety and Product Quality Management, Institute of Ecology, Russian Peoples' Friendship University, Postgraduate Student, Department of System Ecology; junior researcher at the Federal State Budgetary Scientific Institution "Izmerov Research Institute of Occupational Health", e-mail: torazo-414@mail.ru.

Financing: The study had no financial support.

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2023-10211>

Электромагнитные поля (ЭМП) радиочастотного диапазона являются одним из факторов риска для здоровья человека, поэтому увеличение количества источников ЭМП, таких как базовые станции систем сотовой связи нескольких поколений, в местах пребывания человека создает мультиспектрные условия экспозиции населения и приводит к увеличению потенциально негативного риска для здоровья [1, 2, 3]. В экспериментальных исследованиях биологических эффектов ЭМП на животных обычно не используют многочастотные условия экспозиций и рассматривают биологические эффекты ЭМП одной частоты (узкого диапазона частот), соответствующей одному стандарту связи [4, 5, 6]. В связи с этим возрастает актуальность и значимость изучения биологических эффектов мультиспектрных ЭМП, имитирующих реальные условия экспозиции человека, т.е. наличие нескольких частотных диапазонов в условиях облучения одного биологического объекта.

Согласно данным многолетних исследований, наиболее критическими системами организма при воздействии ЭМП радиочастотного диапазона являются нервная, эндокринная, иммунная [7, 8]. При этом большую научную значимость представляет изучение эффектов воздействия ЭМП на возникновение и развитие карбонильного стресса [9, 10]. При избыточном образовании свободных радикалов под влиянием ряда факторов, в том числе ЭМП, возникает окислительный, нитрозативный и карбонильный стресс. При карбонильном стрессе в организме происходит накопление активных карбонильных соединений, способных карбонилировать белковые молекулы, что приводит к модификации белков [11, 12]. Одним из механизмов защиты от карбонильного стресса служит утилизация активных форм кислорода (АФК) в организме посредством работы компонентов антиоксидантной защиты, в числе которых числится каталаза [11, 13].

Цель исследований: изучение динамики показателей карбонильного стресса в крови крыс в условиях подострого многочастотного электромагнитного поля, создаваемого базовыми станциями действующих и перспективных стандартов сотовой связи.

Материалы и методы. Объектами исследований являлись 72 крысы обоего пола линии Wistar весом 267 ± 32 г. Животные содержались в стандартных условиях вивария в контролируемых условиях окружающей среды ($18-20^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха 30-70%). Световой режим комбинированный (естественный/искусственный), составлял 12 часов в сутки. Экспериментальное исследование по оценке биологических эффектов одобрено локальным этическим комитетом ФГБНУ «НИИ МТ». Крысы были распределены на 3 группы по 24 особи в каждой (12 ♂, 12 ♀). Лабораторные животные содержались коллективно в клетках по 6 особей в каждой. В процессе экспозиции клетки с животными размещались на радиопрозрачных (деревянных) стеллажах в зоне облучения на расстоянии 3 метров от источников излучения (антенн).

В лабораторном стенде по облучению животных для первой экспериментальной группы (5G) создавалась имитация экспозиции (ППЭ 500 мкВт/см^2) при работе базовых станций систем сотовой связи стандарта 5G NR IMT-2020 с несколькими центральными частотами (3,5; 28; 37 ГГц). Для второй опытной группы (2-4 G) уровень экспозиции был

идентичен, но имитировалась работа действующих стандартов 2 поколения GSM1800 с центральной частотой 1800 МГц, 3 поколения стандарта UMTS с центральной частотой 2100 МГц и 4 поколения стандарта LTE FDD с центральной частотой 2600 МГц. Третья группа подвергалась мнимому облучению, являясь параллельным контролем. Контроль условий экспозиции в месте расположения животных обеспечивался с использованием Narda NBM-550 (Narda AG, Германия) и Narda SRM-3006 (Narda AG, Германия).

Забор крови у 50% животных каждой группы осуществлялся методом декапитации после окончания 30-дневного истинного или мнимого воздействия, у оставшихся 50 % – через месяц последствия. Карбонильные соединения определяли по их коэффициентам экстинкции ($\epsilon M, \text{мл}^{-1} \times \text{см}^{-1}$) [14]; активность каталазы – методом, основанным на способности перекиси водорода образовывать с солями молибдена стойкий окрашенный комплекс [16], экстинцию определяли спектрофлуориметрическим методом при 410 нм по отношению к контрольному образцу с использованием спектрофотометра Cary-50 (Varian, США).

Статистическую обработку полученных результатов после предварительного определения нормальности распределения данных по критерию Шапиро-Уилка проводили по группам с использованием параметрического критерия Стьюдента.

Результаты. Результаты исследований показали, что после 30 дней экспозиции содержание карбонильных соединений в сыворотке крови крыс обеих экспериментальных групп статистически значимо повышалось относительно данного показателя в контрольной группе (табл.). При этом в группе животных, подвергавшихся воздействию ЭМП в соответствии со стандартом 5 G, отмечалось максимальное увеличение концентрации карбониллов в сыворотке крови. Через 30 дней после прекращения воздействия ЭМП стандарта 5 G отмечено статистически значимое снижение концентрации карбонильных соединений до значений максимально приближенных к группе мнимой экспозиции. При облучении крыс ЭМП на частотах, соответствующих стандартам 2-4 G (1,8; 2,1; 2,6 ГГц), на 30 день после прекращения воздействия статистически значимое повышение содержания карбонильных соединений в сыворотке крови сохранялось.

Таблица

Содержание карбонильных соединений в сыворотке крови крыс в условиях эксперимента, пмоль/л

Table

The content of carbonyl compounds in the blood serum of rats under experimental conditions, pmol/l

| Группа животных | 30 дней экспозиции | 30 дней последствия |
|-------------------|--------------------|---------------------|
| мнимая экспозиция | 439,84±27,65 | 328,31±33,91 |
| группа 1 (5 G) | 501,79±35,66** | 326,97±33,31 |
| группа 2 (2-4 G) | 474,21±37,24* | 401,16±35,47** |
| Самцы | | |
| мнимая экспозиция | 424,38±20,87 | 309,20±26,11 |

| | | |
|-------------------|----------------|---------------|
| группа 1 (5 G) | 517,83±16,64** | 318,35±35,81 |
| группа 2 (2-4 G) | 454,76±9,66* | 380,81±31,25* |
| самки | | |
| мнимая экспозиция | 455,30±25,95 | 347,41±31,18 |
| группа 1 (5 G) | 482,53±44,53 | 335,59±31,30 |
| группа 2 (2-4 G) | 497,56±45,84 | 421,50±28,26* |

Примечание: ** $p < 0,01$, * $p < 0,05$ в сравнении с контрольной группой

Note: ** $p < 0.01$, * $p < 0.05$ vs control group

При сравнении динамики изменений концентрации карбонильных соединений у самцов и самок установлено, что у самцов изменения были аналогичны выявленным по группе в целом, тогда как у самок в группе, подвергавшейся облучению ЭМП в соответствии со стандартами 2-4 G, статистически достоверные различия ($p < 0,05$) с контрольной группой были выявлены через 30 дней после прекращения воздействия.

Оценка активности каталазы показала, что после 30 дней экспозиции ЭМП на частотах 3,5, 28, 37 ГГц отмечена тенденция к увеличению, которая сохранялась и через 30 дней после прекращения воздействия (рис.). При этом гендерных различий в уровне каталазы в сыворотке крови не выявлено.

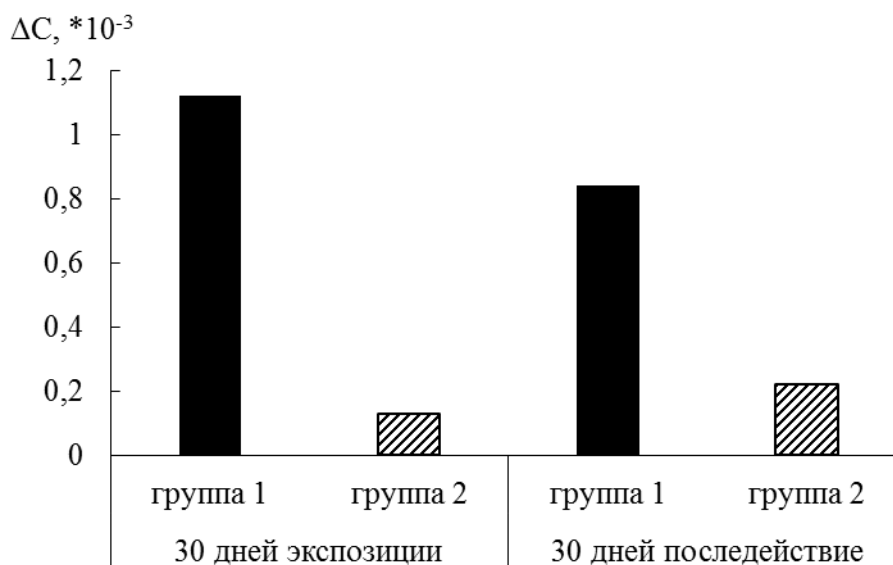


Рис. Разница концентрации каталазы в сыворотки крови крыс опытной группы к контролю, ммоль/л

Fig. The difference in the concentration of catalase in the blood serum of rats of the experimental group to the control, mmol / l

Обсуждение. Полученные данные свидетельствуют о тенденции к усилению работы антиоксидантной защиты, обусловленной повышением активности каталазы, при воздействии на животных ЭМП в соответствии со стандартом 5G. Выявленные изменения

значений эффекторов карбонильного стресса в сыворотке крови экспериментальных животных могут указывать на развитие карбонильного стресса на фоне нарушения баланса между антиоксидантами и карбонильными соединениями.

Полученные в настоящем исследовании результаты подтверждают возможность потенциального влияния ЭМП рассматриваемого диапазона на развитие карбонильного стресса и повышение уровня некоторых звеньев антиоксидантной защиты, в частности каталазы, что совпадает с данными ранее проведенных исследований. Так, в исследовании [17] выявлено усиление окислительных процессов и увеличение уровня АФК в мозге крыс и, как следствие, снижение уровня супероксиддисмутазы, глутатионпероксидазы, повышение активности каталазы при воздействии ЭМП частотой 900 МГц с большей интенсивностью облучения (удельная поглощенная мощность 0,9 Вт/кг) в течение 45 дней.

Однако следует отметить, что также имеются работы, выявившие снижение активности каталазы при воздействии ЭМП радиочастотного диапазона. Например, экспозиция животных ЭМП на частотах 900, 1800 и 2100 МГц (11,64 мВт/м², 11,44 мВт/м² и 8,24 мВт/м² соответственно) в течение месяца по часу в день 5 дней в неделю приводила к повышению продуктов ПОЛ на фоне снижения тканевых антиоксидантов, таких как глутатион, супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионредуктазы, глутатионпероксидазы, глутатион-S-трансферазы и глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы [18]. При исследовании биологических эффектов ЭМП (1800 МГц с ППЭ 37,54 мВт/м²) при экспозиции 12 и 24 часа в сутки в течение 45 дней на окислительно-восстановительный гомеостаз было установлено усиление перекисного окисления липидов, а также снижение уровня активности антиоксидантов в мозге мышей [4].

Каталаза, являясь первым звеном ферментативных антиоксидантов внутриклеточной защиты, метаболизирует пероксид водорода, предотвращая его накопление в клетке [19, 20]. Таким образом, в ответ на возникновение избыточного количества пероксида водорода возможно повышение уровня активности каталазы с целью поддержания гомеостаза. Однако чрезмерное образование АФК может привести к истощению компонентов антиоксидантной защиты, следовательно, в результатах исследований в подобных случаях будет отмечаться понижение содержания антиоксидантов, в том числе каталазы.

Заключение. Результаты исследования свидетельствуют о нарушении равновесия концентраций прооксидантных и антиоксидантных компонентов на фоне активации процессов окисления. Наблюдаемые изменения позволяют предположить, что ЭМП рассматриваемых характеристик могут вызывать карбонильный стресс, в ответ на возникновение которого повышается интенсивность работы адаптационных механизмов организма, в частности антиоксидантной защиты. При этом отмеченный биологический эффект воздействия ЭМП в соответствии со стандартом 5G можно расценить как неустойчивый, в отличие от эффектов, наблюдаемых при экспозиции ЭМП в соответствии со стандартами 2-4 G. Определение активности каталазы в совокупности с карбонильными соединениями может служить биологическим маркером окислительного стресса при влиянии внешних факторов окружающей среды, в том числе электромагнитного излучения.

Список литературы:

1. 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;5(4):167-176.
2. Кудряшов Ю. Б., Перов Ю. Ф., Рубин А. Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008; с. 184.
3. Barbosa Filho J. M. L., Campos M. M. de M., Flor D. L., Alves W. S., D'Assunção A. G., Rodrigues M. E. C. et al. Non-Ionizing Radiation Measurements for Trajectory Radars. *Sensors.* 2022;22(18):7017.
4. 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. *Electromagnetic Biology and Medicine.* 2021;40:1-15.
5. Шилкова Т. В., Шибкова Д. З., Ефимова Н. В., Полевик Н. Д. Оценка биологических эффектов электромагнитного поля радиочастотного диапазона низкой интенсивности на систему крови экспериментальных животных. *Человек. Спорт. Медицина.* 2011;7:10–14.
6. Diem E., Schwarz C., Adlkofer F., Jahn O., Rudiger H., Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800-MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat. Res.* 2005;583:178–183.
7. Valberg P. A., van Deventer T. E., Repacholi M. H. Workgroup Report: Base Stations and Wireless Networks-Radiofrequency (RF) Exposures and Health Consequences. *Environmental Health Perspectives.* 2006;115:416–424.
8. Петин В.Г. Биофизика неионизирующих излучений. Обнинск: ГУ – МРНЦ РАМН, 2006; с. 266.
9. Sokolovic D., Djindjic B., Nikolic J., Bjelakovic G., Pavlovic D., Kocic G. et al. Melatonin reduces oxidative stress induced by chronic exposure of microwave radiation from mobile phones in rat brain. *Journal of Radiation Research.* 2008;49(6):579-586.
10. Юрьева Э. А., Новикова Н. Н., Длин В. В., Воздвиженская Е. С. Молекулярный стресс и хронические нарушения обмена веществ. *Российский вестник перинатологии и педиатрии.* 2020;65(5):12–22.
11. Космачевская О. В., Шумаев К. Б., Топунов А. Ф. Карбонильный стресс: от бактерий до человека. Петрозаводск: Марков Н. А., 2018; с. 254.
12. Turk Z. Glycotoxines, carbonyl stress and relevance to diabetes and its complications. *Physiological research.* 2010;49:147–156.
13. Piedrafita G., Keller M. A., Ralser M. The impact of non-enzymatic reactions and enzyme promiscuity on cellular metabolism during (oxidative) stress conditions. *Biomolecules.* 2015;2015:2101–2122.
14. 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. *Environment international,* 2022;158:106932.

15. 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.
16. Королюк М. А., Иванова Л. И., Майорова И. Г., Токарев В. Е. Метод определения активности каталазы. *Лабораторное дело*. 1988;1:16–19.
17. Kesari K. K., Kumar S., Behari J. 900-MHz microwave radiation promotes oxidation in rat brain. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2011;30(40):219-234.
18. Sharma A., Shrivastava S., Shukla S. Oxidative damage in the liver and brain of the rats exposed to frequency-dependent radiofrequency electromagnetic exposure: biochemical and histopathological evidence. *Free Radical Research*. 2021;55(5):535–546.
19. Латюшин Я. В., Павлова В. И., Мамылина Н. В. Динамика антиоксидантных ферментов в костном мозге животных на фоне коррекции церулоплазмином при действии эмоционально-болевого и гипокинетического стресса. *Вестн. ЧГПУ*. 2009;12:319–326.
20. Карбышев М. С., Абдуллаев Ш. П. Биохимия оксидативного стресса. Учебно-методическое пособие. Москва, 2018; с. 53.

References:

1. 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;5(4):167-176.
2. Kudryashov Yu.B., Perov Yu.F., Rubin A.B. *Radiatsionnaya biophysika: radiotchastotnye i mikrovolnovye elektromagnitnye izlucheniya [Radiation biophysics: radio frequency and microwave electromagnetic radiation]*. М.: FIZMATLIT, 2008; p. 184. (in Russ)
3. Barbosa Filho J.M.L., Campos M.M. de M., Flor D.L., Alves W.S., D'Assunção A. G., Rodrigues M.E.C. et al. Non-Ionizing Radiation Measurements for Trajectory Radars. *Sensors*. 2022;22(18):7017.
4. 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. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2021;40:1-15.
5. Shilkova T.B., Shibkova D.Z., Efimova H.B., Polevik N.D. *Otsenka biologicheskikh effektov elektromagnitnogo poolya radiochastotnogo diapozona nizkoi intensivnosti na sistemy krovi eksperimentalnykh zhivotnykh. Chelovek. Sport. Meditsina*. [Estimation of biological effects of the electromagnetic field of radio frequency range of subzero intensity on system of blood of experimental animals]. *Chelovek. Sport. Meditsina*. 2011;7:10–14. (in Russ)
6. Diem E., Schwarz C., Adlkofer F., Jahn O., Rudiger H. Non-thermal DNA breakage by mobile-phone radiation (1800-MHz) in human fibroblasts and in transformed GFSH-R17 rat granulosa cells in vitro. *Mutat. Res*. 2005;583:178–183.
7. Valberg P.A., van Deventer T.E., Repacholi M.H. Workgroup Report: Base Stations and Wireless Networks-Radiofrequency (RF) Exposures and Health Consequences. *Environmental Health Perspectives*. 2006;115:416–424.

8. *Petin V.G. Biophizika neoniziruyuschikh izlucheniy.* [Biophysics of non-ionizing radiation]. Obninsk: GU – MRNC RAMN, 2006; p. 266. (in Russ.)
9. *Sokolovic D., Djindjic B., Nikolic J., Bjelakovic G., Pavlovic D., Kocic G. et al.* Melatonin reduces oxidative stress induced by chronic exposure of microwave radiation from mobile phones in rat brain. *Journal of Radiation Research.* 2008;49(6):579-586.
10. *Yur'eva E.A., Novikova N.N., Dlin V.V., Vozdvizhenskaya E.S. Molekulyarny stress i khronicheskie narusheniya obmena veshchestv.* [Molecular stress and chronic metabolic disorders]. *Rossiyskiy vestnik perinatologii i pediatrii.* 2020;65(5):12–22. (in Russ)
11. *Kosmachevskaya O. V., Shumaev K. B., Topunov A. F.* Karbonil'ny stress: ot bakteriy do cheloveka. [Carbonyl stress: from bacteria to humans]. Petrozavodsk: Markov N. A., 2018; p. 254. (in Russ)
12. *Turk Z.* Glycotoxines, carbonyl stress and relevance to diabetes and its complications. *Physiological research.* 2010;49:147–156.
13. *Piedrafita G., Keller M. A., Ralser M.* The impact of non-enzymatic reactions and enzyme promiscuity on cellular metabolism during (oxidative) stress conditions. *Biomolecules.* 2015;2015:2101– 2122.
14. *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. *Environment international,* 2022;158:106932.
15. *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.
16. *Korolyuk M. A., Ivanova L. I., Majorova I. G., Tokarev V. E.* Method for determining catalase activity. *Laboratornoe delo.* 1988;1:16–19. (in Russ.)
17. *Kesari K. K., Kumar S., Behari J.* 900-MHz microwave radiation promotes oxidation in rat brain. *Electromagnetic Biology and Medicine.* 2011;30(40):219-234.
18. *Sharma A., Shrivastava S., Shukla S.* Oxidative damage in the liver and brain of the rats exposed to frequency-dependent radiofrequency electromagnetic exposure: biochemical and histopathological evidence. *Free Radical Research.* 2021;55(5):535–546.
19. *Latyushin Ya.V., Pavlova V.I., Mamylyna N.V. Dinamika antioksidantnykh fermentov v kostnom mozge zhivotnykh na phone korrektsii tseruloplazminom pri deistvii emotsionalno-bolevogo i gipokineticheskogo stressa.* [Dynamics in the Bone Marrow of Animals Against the Background of the Correction of Ceruloplasmin by the Action of Emotional-Painful and Hypokinetic Stress]. *Vestn. CHGPU.* 2009;12:319–326. (in Russ)
20. *Karbyshev M.S., Abdullaev S.H. P. Biokhimiya oksidativnogo stressa.* [Biochemistry of oxidative stress]. Teaching aid. Moscow, 2018; p. 53. (in Russ)