

ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОБМЕНА ЖЕЛЕЗА В КРОВИ КРЫС ПРИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ОБЛУЧЕНИИ В ДЕЦИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Аббасова М. Т.*, Гаджиев А. М.

Институт физиологии им. академика Абдуллы Караева Национальной академии наук Азербайджана, AZ1100, Баку, Азербайджан

РЕЗЮМЕ

Введение. Интенсивное развитие радиокommunikаций и электрокоммуникаций, различных электронных устройств приводит к «электромагнитному загрязнению» окружающей среды.

Целью исследования явилось изучение показателей железа в сыворотке крыс, подвергшихся воздействию хронического электромагнитного излучения (ЭМИ) дециметрового диапазона.

Материалы и методы. Исследование проведено на крысах, которые были разделены на экспериментальную и контрольную группы. Экспериментальная группа подразделялась на 4 подгруппы по 10 животных в каждой, которые подвергались воздействию ЭМИ (частота 460 МГц, аппарат «Волна-2») в течение 1, 2, 3 и 4 недель. Контрольную группу (10 крыс) подвергали «ложному» облучению при выключенном аппарате. Оценивали сывороточное железо (СЖ), общую железосвязывающую способность (ОЖСС) и ненасыщенную железосвязывающую способность (НЖСС) сыворотки, насыщение трансферрина железом (НТЖ), сывороточные концентрации трансферрина, гаптоглобина, малонового диальдегида, гидроперекисей липидов.

Результаты. Различия концентраций СЖ с контрольной группой ($30,5 \pm 3,3$ мкмоль/л) обнаружены в подгруппах животных, облученных в течение 3 и 4 недель ($44,1 \pm 3,1$ и $56,8 \pm 4,4$ мкмоль/л соответственно). ОЖСС у опытных животных увеличилась на 41 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой ($110,8 \pm 10,1$ мкмоль/л) только после 3 недель облучения ($156,2 \pm 18,2$ мкмоль/л), на 4-й неделе отмечено уменьшение ОЖСС до $123,6 \pm 16,4$ мкмоль/л. Концентрация трансферрина повысилась с $45,6 \pm 8,0$ мкмоль/л в контроле до $81,0 \pm 11,5$ мкмоль/л на 3-й неделе облучения, на 4-й неделе отмечено ее уменьшение до $55,9 \pm 6,7$ мкмоль/л. НТЖ увеличилось с 27,5 % в контроле до 45,9 % только после 4 недель облучения. Содержание гидроперекисей липидов и малонового диальдегида в крови у облученных крыс было выше по сравнению с контрольными животными. Концентрация гаптоглобина в сыворотке была 26,7 % в контрольной группе, 53,8 мг % после 3 недель и 47,8 мг % после 4 недель облучения.

Заключение. ЭМИ дециметрового диапазона при тотальном хроническом облучении оказывает окислительное действие на организм.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, обмен железа, перекисное окисление липидов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Для цитирования: Аббасова М.Т., Гаджиев А.М. Изменения показателей обмена железа в крови крыс при электромагнитном облучении в дециметровом диапазоне. Гематология и трансфузиология. 2019; 64(3):274–282. <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2019-64-3-274-282>

CHANGES IN THE PARAMETERS OF IRON METABOLISM IN RATS' BLOOD UNDER DECIMETRIC ELECTROMAGNETIC RADIATION

Abbasova M. T. *, Gadzhiev A. M.

A.I. Karaev Institute of Physiology, Azerbaijan National Academy of Sciences, AZ1100, Baku, Azerbaijan

ABSTRACT

Introduction. The intensive development of radio and electrical communications, as well as various electronic devices, leads to the electromagnetic pollution of the environment.

Aim. In this work, the authors set out to study the serum iron parameters of rats exposed to chronic electromagnetic radiation (EMR) of the decimeter range.

Materials and methods. The research was carried out on rats that were divided into experimental and control groups. The experimental group was further divided into 4 subgroups of 10 animals each, which were subsequently exposed to electromagnetic radiation at a frequency of 460 MHz (Volna-2 apparatus) for 1, 2, 3 and 4 weeks. The control group (10 rats) was exposed to pretend irradiation, with the device being turned off. The following parameters were estimated: serum iron (SI), total iron-binding capacity (TIBC) and unsaturated iron-binding capacity (UIBC) of serum, transferrin saturation (TS), as well as serum concentrations of transferrin, haptoglobin, malondialdehyde and lipid hydroperoxides.

Results. Differences in the SI concentration were found in the subgroups of animals exposed to radiation for 3 and 4 weeks ($44.1 \pm 3.1 \mu\text{mol/l}$ and $56.8 \pm 4.4 \mu\text{mol/l}$, respectively), as compared to the control group ($30.5 \pm 3.3 \mu\text{mol/l}$). In experimental animals, TIBC increased by 41 % ($p < 0.05$) — relative to the control group ($110.8 \pm 10.1 \mu\text{mol/l}$) — only following 3 weeks of irradiation ($156.2 \pm 18.2 \mu\text{mol/l}$), with a decrease in TIBC to $123.6 \pm 16.4 \mu\text{mol/l}$ being noted during the 4th week. The concentration of transferrin increased from $45.6 \pm 8.0 \mu\text{mol/l}$ (control) to $81.0 \pm 11.5 \mu\text{mol/l}$ during the 3rd week of radiation exposure, with a decrease to $55.9 \pm 6.7 \mu\text{mol/l}$ being observed during the 4th week. TS increased from 27.5 % (control) to 45.9 % only following 4 weeks of irradiation. The content of lipid hydroperoxides and malondialdehyde in the blood of irradiated rats was higher, as compared to the control animals. The serum concentration of haptoglobin amounted to 26.7 % in the control group, reaching 53.8 mg % and 47.8 mg % following 3 and 4 weeks of exposure, respectively.

Conclusion. The total chronic exposure to decimetric EMR produces an oxidising effect on organisms.

Keywords: electromagnetic radiation, iron metabolism, lipid peroxidation

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

Financial disclosure: the study had no sponsorship.

For citation: Abbasova M.T., Gadzhiev A.M. Changes in the parameters of iron metabolism in rats' blood under decimetric electromagnetic radiation. Russian Journal of Hematology and Transfusiology (Gematologiya i transfuziologiya). 2019; 64(3):274–282 (in Russian). <https://doi.org/10.35754/0234-5730-2019-64-3-274-282>

Введение

Интенсивное развитие радио- и электрокоммуникаций, различных электронных устройств приводит к значительному «электромагнитному загрязнению» окружающей среды и, следовательно, влиянию на биологическую среду и на человека неионизирующего электромагнитного излучения (ЭМИ) в диапазоне микроволновых излучений, охватывающем область от 300 до 3000 МГц. В медицинских учреждениях микроволновые излучения (УВЧ, СВЧ, КВЧ) применяют в лечебных целях. С другой стороны, в обычной жизнедеятельности люди все больше подвергаются воздействию низкоинтенсивных ЭМИ от разных источников, в том числе средств сотовой связи, излучающих в дециметровом диапазоне. С каждым годом растет численность контингента людей, подвергающихся воздействию ЭМИ мобильных телефонов и обслуживающих их базовых станций. Излучения в данном диапазоне могут вызвать различные нарушения в организме, влияя на биохимические реакции [1]. Механизм действия низкоинтенсивных неионизирующих ЭМИ на живые ткани и клетки имеет окислительную природу и включает такие эффекты на молекулярном уровне, как активация генерации активных форм кислорода, активация перекисного окисления, окислительного повреждения белков, ДНК и изменение активности антиоксидантных ферментов [2].

ЭМИ способно ускорять свободнорадикальное перекисное окисление липидов. Установлено, что хроническое облучение ЭМИ дециметрового диапазона приводит к накоплению в крови крыс продукта перекисного окисления липидов — малонового диальдегида [3]. Воздействие ЭМИ уменьшает содержание в сыворотке крови таких элементов, как магний, железо и медь [4]. Железо в организме рассматривается как метаболический модулятор, играющий важную роль в регуляции обмена веществ, в процессах транспорта кислорода, тканевого дыхания, в активации и ингибировании ферментных систем. Нарушения обмена железа клинически проявляются либо дефицитом железа (анемии), либо его перегрузкой (гемохроматоз). Патогенное действие избытка железа обусловлено его способностью к образованию свободных радикалов (реакция Фентона), которые в итоге обуславливают формирование фиброза, цирроза печени. Молекулярные механизмы данных патологий детально описаны у больных с клинически сформированным гемохроматозом и доказанной перегрузкой железа [5, 6].

В литературе имеются отдельные исследования, посвященные изучению обмена железа при облучении организма неионизирующими ЭМИ. Влияние излучения, создаваемого мобильным телефоном, на содержание сывороточного железа, ферритина, ненасыщенной железосвязывающей способности сыворотки (НЖСС) и общей железосвязывающей способности сыворотки (ОЖСС) изучено в экспериментальной модели на кры-

сах [7]. В этом исследовании [7] показано негативное действие ЭМИ на последние два параметра [7]. Негативное действие на содержание сывороточного ферритина обнаружено у крыс, облученных мобильным телефоном [8]. В другом исследовании [9] установлено, что содержание железа и ферритина в сыворотке крови людей, живущих вблизи высоковольтных электрических кабелей, которые создают вокруг электромагнитные поля, было относительно низким. Имеющиеся в литературе исследования, посвященные изучению влияния ЭМИ на параметры обмена железа, не позволяют сделать однозначный вывод о степени этого воздействия в силу различий как объектов исследования, так и параметров облучения (частоты, интенсивности, длительности и т. д.). В этой связи представляется актуальным подход, позволяющий исследовать динамику влияния облучения ЭМИ при длительном эксперименте с использованием конкретного объекта и источника излучения.

Целью настоящего исследования явилось изучение динамики показателей железа в сыворотке крыс, хронически облучаемых ЭМИ дециметрового диапазона.

Материалы и методы

Исследование проведено на белых крысах линии Вистар массой 250–300 г, содержащихся в обычных условиях вивария. Животные были разделены на экспериментальную и контрольную группы. Экспериментальная группа подразделялась на четыре подгруппы по 10 животных в каждой, которые подвергались тотальному облучению ЭМИ в течение 1, 2, 3 и 4 недель. Для облучения использовалось дециметровое излучение (частота 460 МГц), генерируемое физиотерапевтическим аппаратом «Волна-2» (Россия). Крысы помещались в металлическую цилиндрическую камеру диаметром и высотой 20 см. Ежедневное облучение осуществлялось в течение 20 минут при плотности потока мощности 30 мкВт/см². Контрольная группа животных (10 крыс) подвергали «ложному» облучению в тех же условиях, что и экспериментальные, только при выключенном аппарате. Опыты на животных проводились в соответствии с этическими нормами, изложенными в Женевской конвенции “International Guiding principles for Biomedical Research Involving Animals”, протокол эксперимента был одобрен местным комитетом по этике экспериментов на животных (28.11.2012, протокол № 18).

Сывороточное железо (СЖ) и ОЖСС определяли с помощью набора реагентов IRON Liquicolor фирмы “Human” (Германия). В соответствии с инструкцией к набору, концентрация железа при определении СЖ измерялась непосредственно в сыворотке, а при определении ОЖСС — в супернатанте после осаждения избытка трехвалентного железа, добавленного в сыворотку для насыщения трансферрина железом.

Таблица 1. Показатели обмена железа и продуктов перекисного окисления липидов после облучения дециметровым электромагнитным излучением ($M \pm m$)**Table 1.** Parameters of iron metabolism and lipid peroxidation products following decimetric electromagnetic irradiation ($M \pm m$)

Показатели Parameters	Контрольная группа Control group (n = 10)	Экспериментальная группа Experimental group			
		1 нед. облучения 1 week of radiation exposure (n = 10)	2 нед. облучения 2 weeks of radiation exposure (n = 10)	3 нед. облучения 3 weeks of radiation exposure (n = 10)	28 дней облучения 4 weeks of radiation exposure (n = 10)
Сывороточное железо, мкмоль/л Serum iron, $\mu\text{mol/l}$	30,5 \pm 3,3	36,2 \pm 2,6	33,4 \pm 2,9	44,1 \pm 3,1	56,8 \pm 4,4
p		>0,05	>0,05	<0,05	<0,01
ОЖСС, мкмоль/л Total iron-binding capacity, $\mu\text{mol/l}$	110,8 \pm 10,1	120,7 \pm 4,5	111,7 \pm 2,8	156,2 \pm 18,2	123,6 \pm 16,4
p		>0,05	>0,05	<0,05	>0,05
НЖСС, мкмоль/л Unsaturated iron-binding capacity, $\mu\text{mol/l}$	80,3 \pm 6,7	84,5 \pm 6,9	78,3 \pm 5,8	112,1 \pm 19,4	66,8 \pm 5,9
p		>0,05	>0,05	<0,05	<0,05
Трансферрин, мкмоль/л Transferrin, $\mu\text{mol/l}$	45,6 \pm 8,0	53,6 \pm 5,3	46,4 \pm 2,3	81,0 \pm 11,5	55,9 \pm 6,7
p		>0,05	>0,05	<0,01	<0,05
НТЖ, % Transferrin saturation, %	27,5 \pm 3,2	30,0 \pm 3,5	29,9 \pm 3,3	28,2 \pm 3,4	45,9 \pm 5,1
p		>0,05	>0,05	>0,05	<0,05
Гаптоглобин, мг % Haptoglobin, mg%	26,7 \pm 2,8	31,5 \pm 3,0	33,5 \pm 6,5	53,8 \pm 10,3	47,8 \pm 1,6
p		>0,05	>0,05	<0,01	<0,01
МДА, мкмоль/л Malondialdehyde, $\mu\text{mol/l}$	7,7 \pm 0,8	15,1 \pm 1,1	9,8 \pm 1,2	9,4 \pm 0,9	9,1 \pm 0,8
p		<0,001	<0,05	<0,05	<0,05
Гидроперекиси липидов, усл.ед. Lipid hydroperoxides, arb. unit	0,83 \pm 0,2	1,2 \pm 0,08	0,81 \pm 0,06	2,4 \pm 1,0	2,1 \pm 0,44
p		<0,05	>0,05	<0,05	<0,01

Примечание. Достоверность различий **p** — между контрольной и опытными группами животных.

Note. Statistical significance **p** between the control and experimental animal groups.

НЖСС вычисляли по разнице ОЖСС и СЖ в единицах мкмоль/л. Насыщение трансферрина железом (НТЖ) рассчитывали как отношение концентрации СЖ к ОЖСС, выраженное в процентах. Концентрацию трансферрина в сыворотке оценивали по уровню ОЖСС по следующей формуле:

$$0,8 \times \text{ОЖСС} - 43.$$

Содержание малонового диальдегида (МДА) исследовали по методу Л.И. Андреевой и соавт. [10], гидроперекисей липидов (ГПЛ) — по методу А.М. Горячковского [11].

Содержание гаптоглобина в сыворотке определяли по методу, описанному в работе З.Я. Прохуровской и Б.Ф. Мовшовича [12]. Принцип метода заключается в том, что после добавления к сыворотке определенного количества гемоглобина образующийся комплекс гемоглобин-гаптоглобин осаждается риванолом, избыток гемоглобина определяли спектрофотометрически [13].

Статистический анализ. Нормальность распределения выборок проверялась с помощью теста Шапиро — Уилка, уровень достоверности различий показателей в экспериментальной и контрольной группах оценивался по *t*-критерию Стьюдента.

Результаты

Результаты исследований показателей железа, гаптоглобина и перекисного окисления липидов в крови у крыс в экспериментальной и контрольной группах приведены в таблице 1. Достоверные различия концентраций СЖ по сравнению с показателями контрольной группы (30,5 \pm 3,3 мкмоль/л) обнаружены в подгруппах животных, облученных в течение 3 и 4 недель (44,1 \pm 3,1 и 56,8 \pm 4,4 мкмоль/л соответственно). По сравнению с контрольной группой у животных, облученных в течение 3 недель, концентрация СЖ была больше на 44,6 % ($p < 0,05$), у животных, облученных в течение 4 недель, — на 86,2 % ($p < 0,01$), при этом концентра-

ция СЖ была значимо больше при облучении в течение 4 недель, чем 3 недель ($p < 0,05$). ОЖСС у опытных животных увеличилась на 41 % ($p < 0,05$) по сравнению с контрольной группой ($110,8 \pm 10,1$ мкмоль/л) только после 3-недельного облучения ($156,2 \pm 18,2$ мкмоль/л). При облучении в течение 4 недель отмечено уменьшение ОЖСС до $123,6 \pm 16,4$ мкмоль/л, отличия от контрольной группы были статистически незначимы.

Изменения ненасыщенной части железосвязывающей способности сыворотки в течение 4-недельного облучения были схожи с изменениями ОЖСС, с той лишь разницей, что уменьшение НЖСС за 4 недели облучения по отношению к 3 неделям облучения оказалось более существенным, а НЖСС стало достоверно ниже (на 17 %, $p < 0,05$), чем у контрольных животных.

Концентрация трансферрина значимо повысилась с $45,6 \pm 8,0$ мкмоль/л в контрольной группе до $81,0 \pm 11,5$ мкмоль/л на 3-й неделе облучения. Облучение в течение 4 недель приводило к уменьшению концентрации трансферрина до $55,9 \pm 6,7$ мкмоль/л, что, однако, оставалось больше, чем в контроле, на 23 % ($p < 0,05$).

Несмотря на увеличение концентрации СЖ и ОЖСС, показатель НТЖ статистически значимо увеличился с 27,5 % в контрольной группе до 45,9 % только после 4 недель облучения, то есть стал на 67 % больше. При более кратковременном облучении НТЖ превышало значения в контрольной группе всего на 30 %, что характерно для нормального состояния обмена железа. При сравнении показателей железа сыворотки после последних двух недель облучения установлено, что повышенное НТЖ имело место при относительно низких показателях как трансферрина, так и ОЖСС и НЖСС. Это обычно встречается в случаях избыточного содержания железа в организме, на что указывает и высокое СЖ после продолжительного воздействия ЭМИ.

Учитывая существенную роль ионов железа в образовании активных форм кислорода и возникновении окислительного стресса в клетках, исследовали содержание продуктов перекисного окисления липидов в крови у крыс. Как показано в таблице 1, содержание гидроперекисей липидов и малонового диальдегида в крови у облученных крыс было повышено по сравнению с контрольными животными. Это повышение было наиболее выражено после недели облучения. Концентрация малонового диальдегида после 1-й недели облучения возрастала примерно в два раза по сравнению с этим показателем у контрольных животных. В последующие сроки облучения концентрация малонового диальдегида была в среднем на 22 % выше контрольных значений. Концентрация гидроперекисей липидов неравномерно, но в целом достоверно увеличивалась по сравнению с контролем. После 3 и 4 недель облучения концентрация гидроперекисей липидов увеличивалась более чем 1,5 раза. Повышение концентраций продуктов перекисного окисления липидов может быть обусловлено как усилением

окислительной дегградации мембран эритроцитов, так и поступлением этих продуктов из других органов с повышенной скоростью образования активных форм кислорода при участии ионов железа.

Гаптоглобин, образуя комплекс с гемоглобином, высвобождаясь из разрушенных эритроцитов, непосредственно участвует в регуляции обмена железа в сыворотке и вовлечен в регуляцию процессов перекисного окисления липидов в качестве антиоксиданта. Концентрация гаптоглобина в сыворотке крови увеличилась до 53,8 мг % после 3 недель облучения и до 47,8 мг % после 4 недель облучения. Увеличение концентрации гаптоглобина по сравнению с концентрацией гаптоглобина в контрольной группе (26,7 мг %) составило соответственно 101 % ($p < 0,01$) и 79 % ($p < 0,01$).

Обсуждение

Железо — функционально необходимый элемент метаболизма, играющий важнейшую роль в окислительно-восстановительных процессах эритропоэза, тканевом дыхании и ряде биохимических реакций. Для определения дисбаланса железа имеет значение насыщение железом трансферрина, увеличение которого характерно для раннего внутрисосудистого гемолиза. Из трансферрина железо может высвобождаться под действием восстановителей и при закислении среды, а освободившиеся ионы способны катализировать реакции перекисного окисления липидов [13].

Н.И. Рябченко и соавт. [14] показали, что повышение в сыворотке крови облученных крыс содержания перекисных окислительных эквивалентов и концентрации ионов железа создает условия для протекания реакции Фентона, приводящей к повышению концентрации гидроксильного радикала ОН, способного к индуцированию дополнительных повреждений ядерных и мембранных структур облученных клеток.

Повышенный уровень продуктов перекисного окисления липидов (малоновый диальдегид и гидроперекиси липидов) в крови у крыс, подвергшихся ЭМИ дециметрового диапазона, свидетельствует об окислительном действии данного вида неионизирующего излучения. I. Yakymenko и соавт. [2] приводят многочисленные данные *in vitro* и *in vivo* экспериментов о том, что низкоинтенсивное излучение радиочастотного диапазона, в частности в диапазоне частот, генерируемых мобильными телефонами, вызывает окислительный стресс в различных органах и тканях, в том числе в крови. Увеличение содержания сывороточного железа может быть результатом гемолиза эритроцитов вследствие окислительного стресса, вызванного облучением. Повышение содержания малонового диальдегида и активности каталазы в плазме и форменных элементах крови под действием излучения мобильного телефона и физиотерапевтического аппарата было показано в ряде работ [15, 16].

Наблюдаемое в настоящем исследовании одновременное повышение ОЖСС и НЖСС при облучении

животных в течение 3 недель указывает на увеличение концентрации трансферрина в сыворотке. Положительная корреляция между величинами НЖСС и трансферрина показана при определенных патологиях, течение которых сопровождается анемией и изменением показателей, характеризующих метаболизм железа [17].

При умеренном повышении содержания СЖ после 3 недель облучения и увеличении концентрации трансферрина НТЖ (28,2 %) не отличалось значимо от такового в контрольной группе. НТЖ достоверно повышалось до ~46 % у животных, облученных в течение 4 недель, причем на фоне роста СЖ и при значительном снижении ОЖСС, НЖСС и содержания трансферрина. Уменьшение ОЖСС после 4 недель облучения по сравнению с 3 неделями облучения, сопровождавшееся повышением концентрации СЖ, по-видимому, связано с потерей железосвязывающей способности части трансферрина под влиянием окислительного стресса, вызванного микроволновым облучением. Характеризуемый усилением перекисного окисления липидов в крови окислительный стресс может стать и причиной гемолиза эритроцитов, в результате которого содержание ионов железа в плазме повышается. Последнее при меньшем содержании функционального трансферрина обуславливает больший уровень НТЖ.

Если уменьшение концентрации гаптоглобина в сыворотке является чувствительным маркером внутрисосудистого гемолиза, то повышение сывороточной концентрации гаптоглобина указывает на стимулируемый воспалительным процессом синтез посредством цитокинов. Причем повышение сывороточной концентрации гаптоглобина может наблюдаться не сразу, а через несколько дней после стимуляции. Модулирующее действие микроволнового излучения на продукцию цитокинов (как провоспалительных, так и противовоспалительных) фагоцитирующими клетками крови показано в *in vitro* исследованиях [18]. Повышенные значения провоспалительных показателей (общее количество лейкоцитов, содержание интерлейкина-6) показаны в экспериментах *in vivo*, в которых проводилось длительное облучение крыс [19]. Повышение концентрации гаптоглобина в сыворотке в настоящем исследовании при 3-недельном облучении животных, по-видимому, указывает на возможное провоспалительное действие облучения. С учетом того что увеличение сывороточной концентрации гаптоглобина происходит на фоне усиления перекисного окисления липидов в сыворотке крови, оно может рассматриваться как компенсаторный антиоксидантный «вклад» гаптоглобина, обладающего значительной пероксидазной активностью. Уменьшение сывороточной концентрации гаптоглобина при дальнейшем облучении животных, по-видимому, обусловлено внутрисосудистым гемолизом с выходом в кровь гемоглобина, который связывается гаптоглобином.

Низкая, практически равная таковому у необлученных крыс, степень насыщения железом при относительно высоком по отношению к контролю СЖ после 3 недель облучения может быть обусловлена ферритином, являющимся основным депо железа, и церулоплазмином, осуществляющим окисление двухвалентного железа до Fe^{3+} , чтобы оно могло связаться с апотрансферрином с последующим образованием функционального трансферрина. Об уменьшении концентрации сывороточного ферритина под действием микроволнового излучения у экспериментальных животных и человека было сообщено в некоторых работах [7, 8]. Снижение активности церулоплазмينا в крови крыс, облученных при относительно высокой интенсивности ЭМИ (460 МГц, условия облучения аналогичны условиям данного эксперимента), наблюдалось в нашей ранней работе [20]. Нарушения процессов образования трансферрина и накопления железа в ферритине могут быть причиной низкой насыщаемости сывороточных белков железом при повышенном содержании железа, возможно, за счет гемолиза эритроцитов.

В литературе имеются данные, указывающие на то, что электромагнитные поля влияют на параметры обмена железа в сыворотке крови. Однако практически все эти исследования проводились при различных значениях экспозиции и длительности всего эксперимента, причем среди них совсем немного работ, касающихся непосредственно изучения влияния на трансферрин. D.M. Djordjević и соавт. [21] показали, что у крыс сывороточная концентрация трансферрина повышается под действием статического магнитного поля с напряженностью 16 мТл в течение 28 дней. В двух других работах [22, 23] сообщается об увеличении концентрации трансферрина в сыворотке крови у крыс при действии статического магнитного поля с большей напряженностью (128 мТл) и при более короткой экспозиции — от 5 до 15 дней. Хотя в этих же исследованиях была показана противоположная направленность изменений содержания сывороточного железа. В длительном 10-недельном эксперименте, в котором для облучения крыс использовали излучение мобильного телефона с частотой 900 МГц, причем как в режиме разговора, так и в режиме ожидания, было показано значительное уменьшение НЖСС, которое положительно коррелировало с концентрацией трансферрина сыворотки [7]. В данном случае снижению НЖСС сопутствовало также снижение ОЖСС при неизменном содержании сывороточного железа.

Выявленное в настоящем исследовании уменьшение концентрации трансферрина сыворотки на фоне уменьшения ОЖСС, НЖСС после 4 недель облучения крыс ЭМИ 460 МГц по сравнению с 3 неделями облучения напоминает изменения в упомянутой выше работе [7]. Эти изменения свидетельствуют о том, что на обмен железа влияют как параметры самого ЭМИ, так и длительность облучения. Длительное хро-

ническое облучение, вызывая окислительный стресс, может привести к повреждению печени, в которой синтезируется трансферрин, что и является причиной уменьшения НЖСС и ОЖСС. Связь облучения и синтеза трансферрина могли бы подтвердить исследования, изучающие гистопатологические изменения, возникающие в печени под действием ЭМИ. Однако такие исследования не проводились, хотя интенсификация процессов перекисного окисления липидов и окислительная модификация белков в различных органах, в том числе и печени, под влиянием микроволнового облучения всего тела доказаны в экспериментах [24–26].

Почти 50 %-ное насыщение трансферрина железом на фоне увеличения концентрации СЖ и уменьшения ОЖСС, наблюдавшееся у крыс после 4 недель облучения, по-видимому, связано с повышенным содержанием ферритина, экспрессия которого могла быть вызвана избытком железа в предшествующий период облучения. Повышение содержания ферритина в сыворотке крыс, подверженных длительному (до 5 месяцев) хроническому облучению мобильным телефоном, наблюдалось в другой работе [19]. Одновременное определение сывороточного гепсидина, общего количества лейкоцитов и интерлейкина-6 показало повы-

шенные значения этих провоспалительных показателей [19]. Исследования показателей обмена железа при различных заболеваниях печени [27], лейкозах [28] и других онкологических заболеваниях [17], при которых имеются сопутствующие воспалительные процессы, обнаруживают повышение содержания ферритина в сыворотке на фоне снижения концентрации трансферрина и ОЖСС.

Полученные результаты свидетельствуют, что хроническое облучение крыс дециметровыми микроволнами при относительно высокой интенсивности (плотность потока мощности более 30 мкВт/см²) приводит к изменениям показателей железа в сыворотке крови, которые затрагивают активности системы перекисного окисления липидов и функцию белков, участвующих в обмене железа.

Таким образом, получены экспериментальные данные подтверждающие способность неионизирующего ЭМИ дециметрового диапазона оказывать окислительное действие на организм в условиях тотального хронического облучения. По изменению содержания трансферрина и других параметров обмена железа в сыворотке крови можно судить о степени воздействия неионизирующего ЭМИ на организм, а также о функциональном состоянии системы гомеостаза железа.

Литература

1. Григорьев Ю.Г. От электромагнитного смога до электромагнитного хаоса. К оценке опасности мобильной связи для здоровья населения. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2018; (3): 28–32. DOI: 10.12737/article_5b168a752d92b1.01176625.
2. Yakymenko I., Tsybulin O., Sidorik E. et al. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. Electromagn. Biol. Med. 2016; 35(2): 186–202.
3. Abbasova M.T., Gadzhiev A.M. Study of Changes of Protein Carbonyl Content and Lipid Peroxidation Product in Blood of Rats Exposed to Decimeter Electromagnetic Radiation (460MHz). Int. Sci. J. Med. Biol. Sci. <http://bioscience.scientific-journal.com>.
4. Burchard J.F., Nguyen D.H., Block E. Macro- and trace element concentrations in blood plasma and cerebrospinal fluid of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. Bioelectromagnetics. 1999; 20: 358–64.
5. Ganz T. Molecular control of iron transport. J. Am. Soc. Nephrol. 2007; 18(2): 394–400.
6. Gilles A. Iron's ups and downs. Rev. Med. Brux. 2013; 34(4): 328–34.
7. Chetkin M., Demirel C., Kizilkan N. et al. Evaluation of the mobile phone electromagnetic radiation on serum iron parameters in rats. Afri Health Sci. 2017; 17(1): 186–90.
8. Fattahi-Asl J., Baradaran-Ghahfarokhi M., Karbalae M. et al. Diagnostic performance of the human serum ferritin level decreased due to mobile phone exposure. J. Res Med Sci. 2013; 18(1): 84.
9. Hachulla E., Caulier-Leleu M.T., Fontaine O. et al. Pseudo-iron deficiency in a French population living near high-voltage transmission lines: a dilemma for clinicians. Eur J Intern Med. 2000; 11: 351–2.
10. Андреева Л.И., Кожемякин Л.А., Кашкун А.Л. Модификации метода определения перекисей липидов в тесте с тиобарбитуровой кислотой. Лабораторное дело. 1988; (11): 41–3.

References

1. Grigoriev Yu.G. From Electromagnetic Smog to Electromagnetic Chaos. To Evaluating the Hazards of Mobile Communication for Health of the Population. Medicinskaya radiologiya i radiacionnaya bezopasnost'. 2018; (3): 28–32. DOI: 10.12737/article_5b168a752d92b1.01176625 (In Russian).
2. Yakymenko I., Tsybulin O., Sidorik E. et al. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. Electromagn. Biol. Med. 2016; 35(2): 186–202.
3. Abbasova M.T., Gadzhiev A.M. Study of Changes of Protein Carbonyl Content and Lipid Peroxidation Product in Blood of Rats Exposed to Decimeter Electromagnetic Radiation (460MHz). Int. Sci. J. Med. Biol. Sci. <http://bioscience.scientific-journal.com>.
4. Burchard J.F., Nguyen D.H., Block E. Macro- and trace element concentrations in blood plasma and cerebrospinal fluid of dairy cows exposed to electric and magnetic fields. Bioelectromagnetics. 1999; 20: 358–64.
5. Ganz T. Molecular control of iron transport. J. Am. Soc. Nephrol. 2007; 18(2): 394–400.
6. Gilles A. Iron's ups and downs. Rev. Med. Brux. 2013; 34(4): 328–34.
7. Chetkin M., Demirel C., Kizilkan N. et al. Evaluation of the mobile phone electromagnetic radiation on serum iron parameters in rats. Afri Health Sci. 2017; 17(1): 186–90.
8. Fattahi-Asl J., Baradaran-Ghahfarokhi M., Karbalae M. et al. Diagnostic performance of the human serum ferritin level decreased due to mobile phone exposure. J. Res Med Sci. 2013; 18(1): 84.
9. Hachulla E., Caulier-Leleu M.T., Fontaine O. et al. Pseudo-iron deficiency in a French population living near high-voltage transmission lines: a dilemma for clinicians. Eur J Intern Med. 2000; 11: 351–2.
10. Andreeva LI, Kozhemiakin LA, Kishkun AA. Modification of the method of determining lipid peroxidation in a test using thiobarbituric acid. Laboratornoe delo. 1988; (11): 41–3 (In Russian).

11. Горячковский А.М. Клиническая биохимия. Одесса: Астропринт, 1998. 603 с.
12. Прохуровская З.Я., Мовшович В.Л. Исследование гаптоглобина. Лабораторное дело. 1972; 6: 333–5.
13. Орлов Ю.П., Долгих В.Т. Метаболизм железа в биологических системах (биохимические, патофизиологические и клинические аспекты). Биомедицинская химия. 2007; 53(1): 25–38.
14. Рябченко Н.И., Иванник Б.П., Рябченко В.И., Дзиковская Л.А. Влияние ионизирующего излучения, введения ионов железа и их хелатных комплексов на окислительный статус сыворотки крови крыс. Радиационная биология. Радиоэкология. 2011; 51(2): 229–32.
15. Lewicka M., Henrykowska G., Pacholski K. et al. The Impact of Electromagnetic Radiation of Different Parameters on Platelet Oxygen Metabolism – In Vitro Studies. Adv. Clin. Exp. Med. 2015; 24: 31–5.
16. Meral I., Mert H., Mert N. et al. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. Brain Res. 2007; 1169: 120–4.
17. Горошинская И.А., Касаткин В.Ф., Тарнопольская О.В. и др. Изменения показателей обмена железа в крови больных раком желудка. Хирургия. 2015; (3): 29–34. DOI: 10.17116/hirurgia2015529-34
18. Бондарь С.С., Терехов И.В. Продукция цитокинов и активность фагоцитирующих клеток цельной крови в условиях субклинического воспаления и их коррекция в эксперименте. Международный научно-исследовательский журнал. 2016; 46(4): 52–7. DOI: 10.18454/IJR.2016.46.296
19. El-Maleky N.F., Ebrahim R.H. Effects of exposure to electromagnetic field from mobile phone on serum hepcidin and iron status in male albino rats. Electromagn Biol Med. 2019; 38(1): 66–73. DOI: 10.1080/15368378.2018.1531423
20. Аббасова М.Т., Гаджиев А.М. Изучение активности церулоплазмينا в крови у крыс при окислительном действии электромагнитного излучения дециметрового диапазона. Материалы XXIII съезда физиологического общества им. И.П. Павлова. Воронеж. 2017; 836–38.
21. Djordjevic D.M., De Luka S.R., Milovanovich I.D. et al. Hematological changes in mice subchronically exposed to static magnetic fields of different orientations. Ecotoxicol Environ Saf. 2012; 81: 98–105.
22. Elferchichi M., Abdelmelek H., Sakly M. Effects of sub-acute exposure to static magnetic field on iron status and hematopoiesis in rats. Turk J. Hematol. 2007; 24: 64–8.
23. El-Seweidy M.M., Asker M.E., Ali S.I., Atteia H.H. Effect of prolonged intake of iron enriched diet on testicular functions of experimental rats. Nature Science. 2010; 2: 551–556.
24. Bodera P., Stankiewicz W., Antkowiak B. et al. Influence of electromagnetic field (1800 MHz) on lipid peroxidation in brain, blood, liver and kidney in rats. Int. J. Occup. Med. Environ. Health. 2015; 28(4): 751–59.
25. Chetin H., Naziroglu M., Chelik O. et al. Liver antioxidant stores protect the brain from electromagnetic radiation (900 and 1800 MHz -induced oxidative stress in rats during pregnancy and the development of offspring. J Matern Fetal Neonatal Med. 2014; 27(18): 1915–21.
26. Ragy M.M. Effect of exposure and withdrawal of 900-MHz-electromagnetic waves on brain, kidney and liver oxidative stress and some biochemical parameters in male rats. Electromagn Biol Med. 2015; 34(4): 279–84. DOI: 10.3109/15368378.2014.906446
27. Полякова С.И., Анушенко А.О., Баканов М.И., Смирнов И.Е. Анализ и интерпретация показателей обмена железа при разных формах патологии у детей. Российский педиатрический журнал. 2014; (3): 17–23.
28. Сависько А.А., Лагутеева Н.Е., Теплякова Е.Д., Шестопалов А.В. Роль нарушения метаболизма железа в нарушении ритма и проводимости у детей с острым лимфобластным лейкозом. Медицинский вестник Юга России. 2015; (3): 95–100. DOI: 10.21886/2219-8075-2015-3-95-100
11. Goryachkovskiy A.M. Clinical biochemistry. Odessa. Astroprint. 1998. 603 p.
12. Prokhurovskaya Z.Ya., Movshovich V.L. Method and diagnostic significance of determining haptoglobin. Laboratornoe delo. 1972; (6): 333–35 (In Russian).
13. Orlov Yu. P. Dolgich V.T. Iron metabolism in biological systems (biochemical, pathophysiological and clinical perspectives. Biomeditsinskaya Khimiya. 2007; 53 (1): 25–38 (In Russian).
14. Ryabchenko N.I., Ivannik B.P., Ryabchenko V.I., Dzikovskaya L.A. Influence of ionizing radiation, application of iron ions and their chelate complexes on the oxidative status of blood serum of rats. Radiatsionnaya Biologiya, Radioekologiya. 2011; 51(2): 229–32 (In Russian).
15. Lewicka M., Henrykowska G., Pacholski K. et al. The Impact of Electromagnetic Radiation of Different Parameters on Platelet Oxygen Metabolism – In Vitro Studies. Adv. Clin. Exp. Med. 2015; 24: 31–5.
16. Meral I., Mert H., Mert N. et al. Effects of 900-MHz electromagnetic field emitted from cellular phone on brain oxidative stress and some vitamin levels of guinea pigs. Brain Res. 2007; 1169: 120–4.
17. Goroshinskaya I.A., Kasatkin V.F., Tarnopol'skaya O.V. et al. Blood iron metabolism in patients with stomach cancer. Khirurgiya. 2015; (3): 29–34. DOI: 10.17116/hirurgia2015529-34 (In Russian).
18. Bondar S.S., Terekhov I.V. The production of cytokines and the activity of phagocytic cells in whole blood under conditions of inflammation subclinical and their correction in the experiment. Int Res J. 2016; 46(4): 52–7. DOI: 10.18454/IJR.2016.46.296 (In Russian).
19. El-Maleky N.F., Ebrahim R.H. Effects of exposure to electromagnetic field from mobile phone on serum hepcidin and iron status in male albino rats. Electromagn Biol Med. 2019; 38(1): 66–73. DOI: 10.1080/15368378.2018.1531423
20. Abbasova M.T., Gadzhiev A.M. Study of ceruloplasmin activity in blood of Rats Exposed to Decimeter Electromagnetic Radiation. The materials of the XXIII congress of I.P. Pavlov Physiology society. Voronezh. 2017; 836–38 (In Russian).
21. Djordjevic D.M., De Luka S.R., Milovanovich I.D. et al. Hematological changes in mice subchronically exposed to static magnetic fields of different orientations. Ecotoxicol Environ Saf. 2012; 81: 98–105.
22. Elferchichi M., Abdelmelek H., Sakly M. Effects of sub-acute exposure to static magnetic field on iron status and hematopoiesis in rats. Turk J. Hematol. 2007; 24: 64–8.
23. El-Seweidy M.M., Asker M.E., Ali S.I., Atteia H.H. Effect of prolonged intake of iron enriched diet on testicular functions of experimental rats. Nature Science. 2010; 2: 551–6.
24. Bodera P., Stankiewicz W., Antkowiak B. et al. Influence of electromagnetic field (1800 MHz) on lipid peroxidation in brain, blood, liver and kidney in rats. Int. J. Occup. Med. Environ. Health. 2015; 28(4): 751–59.
25. Chetin H., Naziroglu M., Chelik O. et al. Liver antioxidant stores protect the brain from electromagnetic radiation (900 and 1800 MHz -induced oxidative stress in rats during pregnancy and the development of offspring. J Matern Fetal Neonatal Med. 2014; 27(18): 1915–21.
26. Ragy M.M. Effect of exposure and withdrawal of 900-MHz-electromagnetic waves on brain, kidney and liver oxidative stress and some biochemical parameters in male rats. Electromagn Biol Med. 2015; 34(4): 279–84. DOI: 10.3109/15368378.2014.906446
27. Polyakova S.I., Anushenko A. O., Bakanov M.I., Smirnov I.E. Analysis and interpretation of indices of iron metabolism in various forms of pathology in children. Rossiyskiy pediatricheskiy zhurnal. 2014; (3): 17–23 (In Russian).
28. Savisko A.A., Laguteeva N.E., Teplyakova E.D., Shestopalov A.V. Role of impaired iron metabolism in the development of disorders of rhythm and conduction in children with acute lymphoblastic leukemia. Medical Herald of the South of Russia. 2015; (3): 95–100 DOI: 10.21886/2219-8075-2015-3-95-100 (In Russian).

Информация об авторах

Аббасова Мушкуназ Тахир гызы*, кандидат биологических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Лаборатории клеточной физиологии, Институт физиологии им. академика Абдуллы Караева НАН Азербайджана, e-mail: biokimya_65@mail.ru; AZ1100, г. Баку, ул. Шарифзаде, 78.

Гаджиев Ахмед Магомед оглы, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий Лабораторией клеточной физиологии, Институт физиологии им. академика Абдуллы Караева НАН Азербайджана, e-mail: ahmed.hajiyev@yahoo.com

*** Автор, ответственный за переписку**

Поступила: 10.02.2019

Принята к печати: 12.09.2019

Information about the authors

Mushkunaz T. Abbasova*, Cand. Sci. (Biol.), Ass. Prof., Leading Researcher, Laboratory for Cell Physiology, A.I. Karaev Institute of Physiology, Azerbaijan National Academy of Sciences, e-mail: biokimya_65@mail.ru; AZ1100, Baku, Sharifzadeh str., 78.

Ahmed M. Gadzhiev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Prof., Head of the Laboratory for Cell Physiology, A.I. Karaev Institute of Physiology, Azerbaijan National Academy of Sciences, e-mail: ahmed.hajiyev@yahoo.com

*** Corresponding author**

Received 10 Feb 2019

Accepted 12 Sep 2019