

© Коллектив авторов, 2021

УДК 615.847.8.03.015.4.076.9

Терехина Н.А.¹, Селин А.Д.¹, Терехин Г.А.²

Влияние электромагнитного излучения на показатели антиоксидантной защиты в эритроцитах и плазме крови крыс

¹ФГБОУ ВО «Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера» Минздрава России, 614990, Пермь, Россия, Петропавловская ул., д. 26;

²ФГБОУ ВО «Пермская государственная фармацевтическая академия» Минздрава России, 614089, Пермь, Россия, Полевая ул., д. 2

Цель исследования – изучение влияния электромагнитного излучения дециметрового диапазона на показатели антиоксидантной защиты в эритроцитах и плазме крови крыс.

Методика. Эксперименты выполнены на крысах находившихся под влиянием электромагнитного поля дециметрового диапазона в течение 3-х мес. Проведен хемилюминесцентный анализ эритроцитов и плазмы крови животных. Интенсивность свободно радикального окисления в эритроцитах и плазме крови оценивали по показателям: максимальной интенсивности хемилюминесценции (Imax); светосуммы (S); светосуммы после максимального значения хемилюминесценции S(imax); коэффициентам ZImax и Dec. Спектрофотометрически определяли содержание восстановленного глутатиона в эритроцитах. В плазме крови определяли содержание церулоплазмينا, меди и железа. Анализ этих показателей был проведен в динамике исследования через 30, 60 и 90 сут.

Результаты. Длительное (в течение 3 мес) нахождение животных в условиях действия электромагнитного поля приводит к изменениям показателей хемилюминесценции эритроцитов. Изменение показателей Imax, S, S(imax) свидетельствует о нарушении процессов свободнорадикального окисления. В эритроцитах периферической крови крыс при этом установлено повышение содержания глутатиона. В плазме крови выявлено увеличение концентрации церулоплазмينا и меди, снижение содержания железа.

Заключение. Длительное нахождение животных в условиях действия электромагнитного поля приводит к нарушению равновесия в прооксидантно-антиоксидантной системе в эритроцитах. Антиоксиданты глутатион и церулоплазмин являются мишенью для действия электромагнитного излучения дециметрового диапазона. Установлено влияние длительного электромагнитного излучения на показатели минерального обмена: снижение содержания железа и увеличение содержания меди в плазме крови.

Ключевые слова: электромагнитное излучение; антиоксидантная защита; глутатион; церулоплазмин; железо; медь

Для цитирования: Терехина Н.А., Селин А.Д., Терехин Г.А. Влияние электромагнитного излучения на показатели антиоксидантной защиты в эритроцитах и плазме крови крыс. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия.* 2021; 65(3): 73-79.

DOI: 10.25557/0031-2991.2021.03.73-79

Участие авторов: концепция и дизайн исследования, редактирование статьи – Терехина Н.А.; сбор и обработка материала – Селин А.Д., Терехин Г.А.; написание статьи и статистическая обработка результатов исследования – Терехина Н.А., Селин А.Д. Утверждение окончательного варианта статьи – все авторы.

Для корреспонденции: Терехина Наталья Александровна, e-mail: terekhina@list.ru

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила 28.05.2021

Принята к печати 30.06.2021

Опубликована 30.09.2021

Terekhina N.A.¹, Selin A.D.¹, Terekhin G.A.²

The effect of electromagnetic radiation on indexes of antioxidant defense in rat erythrocytes and blood plasma

¹E.A. Vagner Perm State Medical University, Petropavlovskaya St. 26, Perm 614990, Russian Federation;

²Perm State Pharmaceutical Academy, Polevaya St. 2, Perm 614089, Russian Federation

The aim of the research was to study the effect of decimeter-range electromagnetic radiation on indexes of antioxidant defense in rat erythrocytes and blood plasma.

Methods. Experiments were performed on rats exposed to decimeter-range electromagnetic field for three mos. Chemiluminescent analysis of erythrocytes and blood plasma was performed. Intensity of free-radical oxidation in erythrocytes and plasma was

evaluated by parameters of maximum chemiluminescence intensity (I_{max}), light sum (S), the light sum after the maximum chemiluminescence value (i_{max}), and ZI_{max} and Dec coefficients. The content of reduced glutathione in peripheral blood erythrocytes and the plasma contents of ceruloplasmin, iron and copper were measured spectrophotometrically at 30, 60, and 90 days.

Results. A long-term exposure of animals to the electromagnetic field for 3 mos. led to changes in chemiluminescent parameters of erythrocytes. The changes in I_{max} , S , and $Simax$ indicated impairment of free-radical oxidation processes. The content of glutathione was increased in peripheral blood erythrocytes. The plasma contents of ceruloplasmin and copper were increased whereas the content of iron was decreased.

Conclusion. The long-term exposure of animals to the electromagnetic field results in an imbalance of the erythrocyte pro-/antioxidant system. The antioxidants glutathione and ceruloplasmin are targets for the decimeter-range electromagnetic radiation. The study demonstrated the effect of long-term electromagnetic radiation on indexes of mineral metabolism evident as a decrease in the content of iron and an increase in the content of copper in the blood plasma.

Keywords: electromagnetic radiation antioxidant defense; glutathione; ceruloplasmin; iron; copper

For citation: Terekhina N.A., Selin A.D., Terekhin G.A. The effect of electromagnetic radiation on indexes of antioxidant defense in rat erythrocytes and blood plasma. *Patologicheskaya Fiziologiya i Eksperimental'naya terapiya. (Pathological Physiology and Experimental Therapy, Russian Journal)*. 2021; 65(3): 73-79. (in Russian)

DOI: 10.25557/0031-2991.2021.03.73-79

Contribution. The concept and design of the study, editing – Terekhina N.A.; collection and processing of material – Selin A.D., Terekhin G.A.; text writing, statistical processing – Terekhina N.A., Selin A.D. Approval of the final version of the article – all co-authors.

For correspondence: **Terekhina Natalya Aleksandrovna**, Doctor of Medical Sciences, Professor, Head of the Biochemistry Department, Perm State Medical University named after academician E.A. Vagner, 26, Petropavlovskaya Str, 614990, Perm, Russian Federation, e-mail: terekhina@list.ru

Acknowledgment. The study had no sponsorship.

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

Information about the authors:

Terekhina N.A., <https://orcid.org/0000-0002-0168-3785>

Received: 28.05.2021

Accepted: 30.06.2021

Published: 30.09.2021

Введение

Электромагнитное загрязнение окружающей среды – новый экологический фактор риска, который оказывает негативное влияние на деятельность всех органов и систем [1–3]. Наиболее весомый вклад в формирование электромагнитной нагрузки на население приходится на долю мобильных телефонов (МТ). В условиях длительного пребывания в новой техногенной среде человеческий организм вынужден адаптироваться к изменяющимся условиям. Присутствие в организме электромагнитной системы гомеостаза определяет нормальное протекание и регуляцию биохимических и физиологических процессов [4], а чрезмерное использование МТ может способствовать нарушениям в электромагнитной системе гомеостаза [5] и являться фактором риска развития многих заболеваний [6, 7]. Нахождение живых клеток в условиях действия электромагнитного поля (ЭМП) способствует интенсификации образования свободных радикалов, изменению активности антиоксидантных ферментов [8–11]. Антиоксидантная система (АОС) является основным регулирующим звеном в защите от действия свобод-

норадикальных метаболитов. В эксперименте на животных установлено, что электромагнитное излучение (ЭМИ) в диапазоне крайне высоких частот (53,57–78,33 ГГц) способствует ингибированию перекисного окисления липидов посредством увеличения антиоксидантного статуса крови в послеоперационном периоде [12]. Для наиболее полного выяснения влияния ЭМИ, исходящего от МТ, необходимым является понимание молекулярных механизмов защиты клеток. В реальной ситуации ЭМИ взаимодействует с различными факторами окружающей среды, которые могут ослаблять или усиливать его действие. Для достоверной оценки влияния ЭМИ на организм необходимо проводить экспериментальные исследования с использованием однофакторных моделей, качественные и количественные параметры которых максимально приближены к реальным условиям.

Цель исследования – оценка влияния электромагнитного излучения дециметрового диапазона на показатели антиоксидантной защиты в эритроцитах и плазме крови крыс.

Методика

Исследование проведено в соответствии с международными требованиями к проведению работ с экспериментальными животными, с соблюдением принципов гуманности, изложенных в директивах Европейского сообщества (86/609/ЕСС) и Хельсинкской декларации. Работа одобрена локальным этическим комитетом ФГБОУ ВО «ПГМУ им. Акад. Е.А. Вагнера» МЗ РФ (протокол № 2 от 26 февраля 2020).

В эксперименте использовано 80 белых нелинейных крыс массой 150-220 г, содержащихся на смешанном сбалансированном рационе со свободным доступом к воде. Животные были разделены на 2 группы: 1-я – (контроль) интактные животные ($n=20$) находились в помещении вивария, 2-я – крысы опытной группы ($n=60$) были размещены в другом помещении, где в течение 3 мес находились под действием электромагнитного поля (ЭМП) дециметрового диапазона. Для имитации реальной ситуации с частым воздействием электромагнитных полей на организм человека, (излучение МТ в режиме ожидания), была спроектирована модель облучения на животных. Расчёт фоновых значений плотности потока электромагнитной энергии производили с помощью измерителя (ПЗ-33М) согласно санитарно-эпидемиологическим требованиям к физическим факторам на рабочих местах (СанПиН 2.2.4.3359-16). Фоновые значения составляли не более $0,1 \text{ мкВт/см}^2$. ЭМП создавали с помощью шести МТ распространенной марки «Nokia» с несущей частотой 1745 МГц. Для достижения равномерного распределения электромагнитной нагрузки в течение продолжительного периода была использована программа «Auto Redial». С помощью данной программы одновременно производились звонки на МТ, которые создавали следующие условия облучения животных: несущая частота 1745 МГц, 170 мин/день, фракциями по 30 с в режиме дозона с интервалом в 4 мин. На протяжении всего эксперимента животные находились в клетках, изготовленных из радиопрозрачного материала (полиметилметакрилата), по 10 особей в одной клетке. МТ располагались на специальных подставках по ширине клетки, с каждой стороны по 3 телефона на расстоянии 5 см от клетки. В зависимости от удаленности антенны МТ плотность потока электромагнитной энергии в клетке составляла в среднем $67,0 \pm 5,0 \text{ мкВт/см}^2$ с экспозицией 170 мин, что соответствует предельно допустимому уровню энергетических экспозиций $200 \text{ мкВт/см}^2/\text{ч}$ для данного диапазона частот. По истечению срока облучения животных выводили из эксперимента декапитацией под эфирным наркозом.

Забор крови производили в вакуумные пробирки «Improvacuter» с гепарином. Центрифугировали кровь при 3000 об/мин в течение 10 мин. После удаления плазмы крови в пробирку с оставшейся эритроцитарной массой добавляли физиологический раствор. Процедуру отмывания эритроцитов повторяли трижды. Эритроцит – это доступный объект, которому присущи общие принципы молекулярной организации мембранных структур различных органов и тканей [13, 14]. Состояние биологической мембраны эритроцита является одним из важных факторов регуляции гомеостатических параметров и обеспечения биохимических и физиологических процессов в организме, поэтому для оценки интенсивности процессов образования свободнорадикальных метаболитов использовали хемилюминесцентный анализ эритроцитов и плазмы крови с помощью биохемилюминометра БХЛ-07 (Россия) по методу [15]. Интенсивность протекания СРО в эритроцитах и плазме крови оценивали по 8 показателям: I_{max} – максимальная интенсивность ХЛ, S – светосумма, $Simax$ – светосумма после максимального значения ХЛ, коэффициенты Z_{max} и Dec . Для оценки антиоксидантного потенциала (АОП) эритроцитарных мембран и плазмы крови использовали значения показателя $tg2$, и коэффициенты a и Z . Уровень восстановленного глутатиона в эритроцитах периферической крови крыс определяли спектрофотометрически по методу [16]. В плазме крови изучали содержание церулоплазмينا по методу [17]. Анализ этих показателей проводился в динамике исследования через 30, 60 и 90 сут. Содержание меди в плазме крови определяли с помощью набора реактивов «Медь-Витал» (Санкт-Петербург), уровень железа с помощью набора реактивов «Вектор-Бест» (Новосибирск) на спектрофотометре PD-303 (ApeI, Япония).

Статистическую обработку результатов проводили с применением методов вариационной статистики в программах Statistica 10.0 (StatSoft, США) и Microsoft Excel. Оценку значимости различий проводили с помощью t -критерия Стьюдента, данные представлены как $M \pm m$. Используемый уровень значимости $p < 0,05$.

Результаты

При проведении ХЛ анализа из 8 показателей наиболее информативными оказались 4: I_{max} , S , $Simax$ и $tg2$. Были установлены изменения в интенсивности протекания свободнорадикальных процессов в эритроцитах: снижение максимальной интенсивности хемилюминесценции эритроцитов (I_{max}) в 2 раза, светосуммы (S) в 3 раза, светосуммы после максимального значения хемилюминесценции ($Simax$) в 2,5 раза

по сравнению с контролем – группой интактных животных (табл. 1). Вместе с тем установлено статистически значимое увеличение в 2 раза показателя tg2, отражающего антиоксидантный потенциал крови, по сравнению с группой интактных животных. Снижение показателей I_{max}, S, S_{imax} свидетельствует о снижении процессов свободнорадикального окисления. В плазме крови животных опытной группы статистически значимых изменений выявлено не было (табл. 1).

Для оценки состояния антиоксидантной защиты в эритроцитах периферической крови крыс использовали содержание восстановленного глутатиона, которое статистически значимо увеличивается при действии ЭМИ (табл. 2). Значимо увеличивается также содержание белка острой фазы воспаления, антиоксиданта церулоплазмينا (ЦП) в плазме крови крыс, находившихся под действием ЭМИ, (табл. 2). Значимых изменений ЦП и глутатиона через 30 и 60 сут не выявлено. Только через 90 сут значимо увеличивается содержание ЦП в плазме крови и глутатиона в эритроцитах (табл. 2).

При определении содержания минеральных веществ было установлено, что содержание меди (Cu²⁺) в плазме крови крыс, которые в течение длительного времени находились под действием ЭМИ, увеличивалось на 24% по сравнению с группой интактных животных (табл. 3). Содержание железа (Fe²⁺) в плазме крови крыс через 90 сут влияния ЭМИ статистически значимо снижалось на 42% (табл. 3).

Обсуждение

Ведущая роль в формировании ответной реакции организма на воздействие повреждающих факторов окружающей среды, к числу которых относится ЭМИ, принадлежит крови, как одной из наиболее реактивных систем. Хемилюминесцентный (ХЛ) анализ – это универсальный, перспективный и высокочувствительный метод оценки состояния свободнорадикальных процессов в организме. Увеличение показателей ХЛ анализа: I_{max}, S, S_{imax} наблюдается в экспериментальных исследованиях при герпетическом кератите у кроликов [18], при отравлении фосфорорганическими соедине-

Таблица 1/Table 1

Хемилюминесцентный анализ эритроцитов и плазмы периферической крови крыс через 90 сут в условиях действия электромагнитном облучении дециметрового диапазона, (M±m)

Chemiluminescent analysis of peripheral blood erythrocytes and plasmas in rats after 90 days of exposure to the decimeter-range electromagnetic radiation, (M±m)

Группы животных	Эритроциты				Плазма			
	I _{max} (мВ)	S (мВ×сек)	S _{imax} (мВ×сек)	tg2	I _{max} (мВ)	S (мВ×сек)	S (мВ×сек)	tg2
Интактная группа	64,4±12,8	218,8±46,7	191,4±40,6	-29,7±6,5	452,1±25,8	4582,2±176,0	4181,6±157,6	-93,4±9,8
Опытная группа	31,4±4,3*	77,1±8,2*	74,2±5,7*	-13,5±1,3*	413,9±27,5	4342,2±149,5	3970,3±132,3	-88,4±10,8

Примечание. * – статистически значимые различия (p<0,05) в сравнении с группой интактных животных.

Note. * – p<0.05, significant differences from control rats.

Таблица 2/Table 2

Содержание восстановленного глутатиона (мкмоль/г Hb) в эритроцитах и церулоплазмينا (мг/л) в плазме крови крыс при электромагнитном излучении дециметрового диапазона, (M±m)

Content of reduced glutathione in erythrocytes (μmol/g Hb) and ceruloplasmin (mg/l) in plasma of rats exposed to the decimeter-range electromagnetic radiation

Группы животных	Глутатион	Церулоплазмин
Интактная группа	2,28±0,10	255,95±12,18
Влияние ЭМИ дециметрового диапазона:		
Опытная группа (30 сут)	2,35±0,16	257,64±15,64
Опытная группа (60 сут)	2,49±0,20	270,26±17,07
Опытная группа (90 сут)	2,83±0,07*	295,17±14,48*

Примечание. * – статистически значимые различия (p<0,05) в сравнении с группой интактных животных.

Note. * – p<0.05, significant differences from control rats.

ниями крыс [13], при аллоксановом сахарном диабете [19], черепно-мозговой травме у крыс [20]. Известно, что в эксперименте у крыс показатели хемилюминесценции могут изменяться разнонаправленно: уменьшаются при остром отравлении этанолом [21], гипоксии, онкологических процессах. Снижение показателей интенсивности ХЛ анализа крови связано с нарушением проницаемости мембран клеток и последующим выходом в кровь низкомолекулярных пептидов. Известно, что снижают интенсивность ХЛ содержащиеся в крови антиоксиданты: ЦП, глутатион, ионы переменной валентности (медь, железо) [22]. Изменение проницаемости плазматической мембраны эритроцитов адекватно отражает процессы окислительного стресса, может рассматриваться, как показатель общей клеточной проницаемости. Ранее нами было показано, что длительное пребывание животных в условиях действия ЭМП дециметрового диапазона приводит к повышению проницаемости эритроцитарных мембран [23].

Система глутатиона является естественной цитопротекторной системой при острых интоксикациях [24]. В зависимости от длительности и степени тяжести заболевания изменения в системе глутатиона имеют разнонаправленный характер. Ранние стадии патологического процесса сопровождаются адаптивными компенсаторными изменениями глутатионовой системы. В последующем течение заболевания характеризуется дезадаптацией и дисбалансом глутатионпероксидазной активности, что способствует прогрессированию заболевания [25]. Показано, что уровень восстановленного глутатиона в эритроцитах может компенсаторно повышаться при обострении хронического панкреатита [25].

Показатели антиоксидантной защиты оказались чувствительными к действию ЭМИ. Влияние ЭМИ в течение 90 сут оказалось более существенным и привело к увеличению глутатиона и ЦП в крови, что способствовало снижению процессов СРО в эритроцитах. Повышение уровня восстановленного глутатиона в эритроцитах и ЦП в плазме крови крыс при длительном влиянии

ЭМИ дециметрового диапазона в предельно допустимой энергетической экспозиции $200(\text{мкВт}/\text{см}^2) \cdot \text{ч}$ может рассматриваться в качестве адапционного ответного механизма активации антиоксидантной защиты на повреждающее действие ЭМИ.

Состояние печени оказывает влияние на содержание неферментативных антиоксидантов и активность антиоксидантных ферментов [26]. ЭМИ повреждает биологические мембраны, в том числе мембраны эритроцитов и гепатоцитов. Белок острой фазы воспаления ЦП синтезируется в печени, транспортирует медь и обладает ферроксидазной активностью по отношению к ионам двухвалентного железа. Длительное, в течение 90 сут, влияние ЭМП, создаваемое мобильными телефонами, приводит к снижению уровня железа в плазме крови, что может быть обусловлено нарушением транспортных механизмов железа в организме. ЭМИ влияет на экспрессию белков: гепсидина, ферритина, интерлейкина 6 и общего количества лейкоцитов с последующим ухудшением параметров Fe^{2+} [27]. Гепсидин является главным гуморальным регулятором системного гомеостаза железа, который напрямую коррелирует с выраженностью воспалительных процессов в организме. Повышение синтеза гепсидина при воспалительных процессах способствует ингибированию белковых переносчиков железа, что приводит к снижению абсорбции Fe^{2+} в кишечнике и блокировке выхода Fe^{2+} из макрофагов, с последующим накоплением его в органах и тканях. Избыточное содержание железа (Fe^{2+}) в органах и тканях сопряжено с цитотоксическим эффектом, который обусловлен способностью двухвалентного железа запускать цепные свободно-радикальные реакции, с последующим повреждением белковых структур. Накопление железа в паренхиматозных органах приводит к дегенеративным изменениям и прогрессирующему развитию фиброза, необратимым нарушениям функций печени, поджелудочной железы и сердца [28]. В периферической крови при этом наблюдается снижение уровня же-

Таблица 3/Table 3

Содержание меди и железа в мкмоль/л в плазме крови крыс при электромагнитном облучении дециметрового диапазона ($M \pm m$)
Contents of copper and iron ($\mu\text{mol/l}$) in blood plasma of rats exposed to the decimeter-range electromagnetic radiation, ($M \pm m$)

Группы животных	Медь	Железо
Интактная группа	55,8 \pm 2,14	43,4 \pm 0,90
Опытная группа	73,5 \pm 3,57*	25,2 \pm 0,88*

Примечание. * – статистически значимые различия ($p < 0,05$) в сравнении с группой интактных животных.

Note. * – $p < 0.05$, significant differences from control rats.

леза, с последующим развитием анемии. Снижение содержания железа Fe^{2+} в плазме крови при длительном действии ЭМИ дециметрового диапазона связано и с увеличением ферроксидазной активности ЦП. Несмотря на компенсаторное повышение ЦП, уровень меди в плазме крови существенно повышается, что является неблагоприятным фактором. Определение содержания меди в плазме крови имеет значение для оценки степени поражения печени при заболеваниях гепатобилиарного тракта [29].

Заключение

Длительное воздействие электромагнитного излучения дециметрового диапазона от мобильных устройств приводит к нарушению равновесия в системе прооксиданты — антиоксиданты в эритроцитах периферической крови. Антиоксиданты глутатион и церулоплазмин являются мишенью для действия электромагнитного излучения дециметрового диапазона. Установлено влияние электромагнитного излучения на показатели минерального обмена: снижение содержания железа (Fe^{2+}) и увеличение содержания меди (Cu^{2+}) в плазме крови. Снижение уровня железа в плазме крови при электромагнитном излучении свидетельствует о развитии анемии. Повышение содержания меди (Cu^{2+}) в плазме крови при электромагнитном излучении имеет значение для определения степени повреждения гепатоцитов.

Литература

(п.п. 5; 8-11; 16; 27; 28 см. References)

1. Соловьёв В.С., Жевновская А.Н., Гашев С.Н., Соловьёва С.В. Влияние электромагнитного излучения промышленной частоты на гематологические показатели периферической крови грызунов. *Принципы экологии*. 2016; 18(2): 84-90.
2. Григорьев О.А., Степанов В.С. Антропогенное электромагнитное загрязнение окружающей среды как новый глобальный экологический фактор эволюционного значения. *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2008; 23(3): 22-3.
3. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. *Сотовая связь и здоровье: Электромагнитная обстановка. Радиобиологические и гигиенические проблемы. Прогноз опасности*. М.: Экономика; 2013.
4. Лиманский Ю.П., Самосюк И.З., Самосюк Н.И., Чухраев Н.В. Концепция электромагнитного гомеостаза и теоретическое обоснование применения низкоинтенсивных электромагнитных полей в клинической практике. *Вестник физиотерапии и курортологии*. 2013; 19(3): 18-22.
6. Жаворонков Л.П., Петин В.Г. Влияние электромагнитных излучений сотовых телефонов на здоровье. *Радиация и риск (Бюллетень Национального радиационно-эпидемиологического регистра)*. 2016; 25(2): 43-56.
7. Румянцев Г.И., Прохоров Н.И., Несвижский Ю.В., Виноградов М.А. Анализ патогенетической значимости излучений мобильных телефонов. *Вестник РАМН*. 2004; 6: 31-5.
12. Полякова А.Г., Соловьева А.Г., Сазонова И.Е., Захарова Д.В. Влияние электромагнитного излучения крайне высоких частот на про- и антиоксидантный статус крови в эксперименте. *Биофизика*. 2016; 61(1): 131-7.
13. Терехина Н.А., Зорин М.Г., Терехин Г.А. Влияние сапропелевых грязей на показатели окислительного стресса и антиоксидантной защиты при остром отравлении карбофосом. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*. 2007; 1: 6-8.
14. Савлуков А.И., Самсонов В.М., Камиллов Р.Ф. и др. Состояние устойчивости эритроцитов как звено адаптации организма. *Медицинский вестник Башкортостана*. 2011; 6(4): 13-7.
15. Кузьмина Е.И., Нелюбин А.С., Щенникова М.К. Применение индуцированной хемилюминесценции для оценки свободно-радикальных реакций в биологических субстратах. *Биохимия и биофизика микроорганизмов: межвузовский сборник*. Горький. 1983: 179-83.
17. Камышников В.С. *Клинико-биохимическая лабораторная диагностика: Справочник*. М.: МЕД. пресс-информ; 2009.
18. Петрович Ю.А., Терехина Н.А., Шмагель К.В. Влияние селенита натрия на активность глутатионпероксидазы и супероксиддисмутазы в тканях глаза при герпетическом кератите. *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 1987; 4: 405-7.
19. Терехина Н.А., Ненашева О.Ю. Хемилюминесцентный анализ биологических жидкостей больных сахарным диабетом. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2004; 11: 38-9.
20. Колесникова А.А., Флейшман М.Ю., Якушева Н.Ю., Слободенюк Е.В., Толстенок И.В. Уровень окислительного стресса в ткани мозга крыс после черепно-мозговой травмы при введении синтетических регуляторных пептидов. *Тихоокеанский медицинский журнал*. 2020; 3: 65-7.
21. Терехина Н.А., Жидко Е.В., Терехин Г.А., Орбиданс А.Г. Влияние сорбентов на показатели антиоксидантной защиты и свободнорадикального окисления при острой алкогольной интоксикации. *Сибирское медицинское обозрение*. 2017; 6: 53-9.
22. Винник Ю.С., Савченко А.А., Перьянова О.В., Теплякова О.В., Якимов С.В., Тепляков Е.Ю. и др. Клинические аспекты применения хемилюминесцентного анализа. *Сибирское медицинское обозрение*. 2006; 40(3): 3-6.
23. Селин А.Д., Терехина Н.А., Терехин Г.А. Влияние электромагнитного излучения на проницаемость эритроцитарных мембран. *Крымский журнал экспериментальной и клинической медицины*. 2020; 10(4): 43-9.
24. Глушков С.И., Куценко С.А. Система глутатиона как естественная цитопротекторная система в условиях острых интоксикаций. *Медико-биологические проблемы противолучевой и противохимической защиты*. 2004; 67-8.
25. Меринова Н.И., Козлова Н.М., Колесниченко Л.С., Сулова А.И., Ясько М.В., Егорова И.Э. и др. Малоновый диальдегид и система глутатиона в крови у больных хроническим панкреатитом в зависимости от длительности заболевания. *Сибирский медицинский журнал*. 2013; 4: 67-9.
26. Терехина Н.А., Заривчацкий М.Ф., Владимиров А.А., Хлебников В.В. Показатели антиоксидантной защиты при остром и хроническом холецистите. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2008; 4: 41-3.
29. Терехина Н.А., Терехин Г.А., Жидко Е.В., Орбиданс А.Г. Прогностическое значение определения содержания меди при заболеваниях гепатобилиарного тракта. *Клиническая лабораторная диагностика*. 2015; 9: 63.

References

- Solovyov V.S., Zhevnovskaya A.N., Gashev S.N., Solovyova S.V. Influence of electromagnetic radiation of industrial frequency on hematological parameters of the peripheral blood of rodents. *Prinsipy ekologii*. 2016; 18(2): 84–90. (in Russian)
- Grigoriev O.A., Stepanov V.S. Anthropogenic electromagnetic pollution as a new global environmental factor of evolutionary importance. *Vestnik Rossiyskoy voenno-meditsinskoy akademii*. 2008; 23(3): 22–3. (in Russian)
- Grigoriev Y.G., Grigoriev O.A. *Cellular communication and health. Electromagnetic conditions. Radiobiological and hygienic problems. The forecast of danger. [Sotovaya svyaz' i zdorov'e: Elektromagnitnaya obstanovka. Radiobiologicheskie i gigienicheskie problemy. Prognoz opasnosti]*. Moscow: Economy; 2013. (in Russian)
- Limanskij Yu.P., Samosyuk I.Z., Samosyuk N.I., Chuxraev N.V. The concept of electromagnetic homeostasis and theoretical justification for the use of low-intensity electromagnetic fields in clinical practice. *Vestnik fizioterapii i kurortologii*. 2013; 19(3): 18–22. (in Russian)
- Gherardini L., Ciuti G., Tognarelli S., Cinti C. Searching for the perfect wave: the effect of radiofrequency electromagnetic fields on cells. *Int. J. Mol. Sci.* 2014; 15: 5366–87.
- Zhavoronkov L.P., Petin V.G. The impact of electromagnetic radiation from cell phones on health. *Radiatsiya i risk (Byulleten Natsionalnogo radiatsionno-epidemiologicheskogo registra)*. 2016; 25(2): 43–56. (in Russian)
- Rumyancev G.I., Proxorov N.I., Nesvizhskij Yu.V., Vinogradov M.A. Analysis of the pathogenetic significance of mobile phone radiation. *Vestnik RAMN*. 2004; 6: 31–35. (in Russian)
- Calcabrini C., Mancini U., De Bellis R., Diaz A.R., Martinelli M., Cucchiari L., et al. Effect of extremely low-frequency electromagnetic fields on antioxidant activity in the human keratinocyte cell line NCTC 2544. *Biotechnology and applied biochemistry*. 2017; 64(3): 415–22.
- Georgiou C.D. Oxidative stress induced biological damage by low level EMFs: mechanism of free radical pair electron spin polarization and biochemical amplification. *Eur. J. Oncol.* 2010; 5: 66–113.
- Yakymenko I., Tsybulin O., Sidorik E., et al. Oxidative mechanisms of biological activity of low-intensity radiofrequency radiation. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2016; 35(2): 186–202.
- Hisidoglu E., Kantar Gok D., Er H., et al. 2100-MHz electromagnetic fields have different effects on visual evoked potentials and oxidant/antioxidant status depending on exposure duration. *Brain research*. 2016; 1635: 1–11.
- Polyakova A.G., Soloveva A.G., Sazonova I.E., et al. The influence of electromagnetic radiation of extremely high frequencies on the pro- and antioxidant status of blood in experiments. *Biophysics*. 2016; 61(1): 109–14.
- Terekhina N.A., Zorin M.G., Terekhin G.A. Effect of spropeline mud on indicators of oxidative stress and antioxidant protection in acute carbophos poisoning. *Patologicheskaya Fiziologia i Eksperimental'naya terapiya*. 2007; (1): 6–8. (in Russian)
- Savlukov A.I., Samsonov V.M., Kamilov R.F. The state of red blood cell resistance as a link of adaptation of the body. *Meditsinskiy vestnik Bashkortostana*. 2011; 6(4): 13–7. (in Russian)
- Kuzmina E.I., Nelyubin A.S., Shchennikova M. K. Application of induced chemiluminescence to assess free-radical reactions in biological substrates. *Biokhimiya i biofizika mikroorganizmov: mezhdunarodskiy sbornik. Gor'kiy*. 1983: 179–83. (in Russian)
- Beutler E. *Red Cell Metabolism: A Manual of Biochemical Methods*. 3rd ed. New York: Grune & Stratton; 1990: 131–4.
- Kamyshnikov V.S. *Clinical and biochemical laboratory diagnostics: Guide. [Kliniko-biokhimicheskaya laboratornaya diagnostika: Spravochnik]*. Moscow: MED. press-inform; 2009. (in Russian)
- Petrovich Y.A., Terekhina N.A., Shmagel K.V. The effect of sodium selenite on the activity of glutathione peroxidase and superoxide dismutase in the tissues of the eye in herpetic keratitis. *Byulleten eksperimental'noy biologii i meditsiny*. 1987; 4: 405–7. (in Russian)
- Terekhina N.A., Nenasheva O.Y. Chemiluminescent analysis of biological fluids in patients with diabetes mellitus. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*. 2004; 11: 38–9. (in Russian)
- Kolesnikova A.A., Flejshman M.Yu., Yakusheva N.Yu., Slobodenyuk E.V., Tolstenok I.V. The level of oxidative stress in rat brain tissue after traumatic brain injury upon administration of synthetic regulatory peptides. *Tikhookeanskiy meditsinskiy zhurnal*. 2020; 3: 65–7. (in Russian)
- Terekhina N.A., Zhidko E.V., Terekhin G.A., Orbidans A.G. Influence of sorbents on indicators of antioxidant protection and free radical oxidation in acute alcohol intoxication. *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie*. 2017; 6: 53–9. (in Russian)
- Vinnik Yu.S., Savchenko A.A., Perianova O.V., Teplyakova O.V., Yakimov S.V., Teplyakov E.Yu., et al. Clinical aspects of the use of chemiluminescence analysis. *Sibirskoe meditsinskoe obozrenie*. 2006; 40(3): 3–6. (in Russian)
- Selin A.D., Terekhina N.A., Terekhin G.A. Influence of electromagnetic radiation on the permeability of erythrocyte membranes. *Krymskiy zhurnal eksperimental'noy i klinicheskoy meditsiny*. 2020; 10(4): 43–9. (in Russian)
- Glushkov S.I., Kutsenko S.A. The glutathione system as a natural cytoprotective system under conditions of acute intoxication. *Mediko-biologicheskie problemy protivoluchevoy i protivokhimicheskoy zashchity*. 2004; 67–8. (in Russian)
- Merino N.I., Kozlova N.M., Kolesnichenko L.S., Suslova A.I., Yasko M.V., Egorova I.E., et al. Malondialdehyde and the system of glutathione in the blood in patients with chronic pancreatitis, depending on the duration of the disease. *Sibirskiy meditsinskiy zhurnal*. 2013; 4: 67–9. (in Russian)
- Terekhina N.A., Zarivchatsky M.F., Vladimirov A.A., Khlebnikov V.V. Antioxidant protection in acute and chronic cholecystitis. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*. 2008; (4): 41–3. (in Russian)
- 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. *Electromagnetic Biology and Medicine*. 2019; 38(1): 66–73.
- Porter J.B. Monitoring and treatment of iron overload: state of the art and new approaches. *Sem. Hematol.* 2005; 42(2): 14–8.
- Terekhina N.A., Terekhin G.A., Zhidko E.V., Orbidans A.G. Predictive value of determining the copper content in diseases of the hepatobiliary tract. *Klinicheskaya laboratornaya diagnostika*. 2015; 9: 63. (in Russian)

Сведения об авторах:

Терехина Наталья Александровна, доктор мед. наук, проф., зав. каф. биохимии ФГБОУ ВО «Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера» Минздрава России, e-mail: terekhina@list.ru;

Селин Алексей Дмитриевич, ст. преподаватель каф. биохимии ФГБОУ ВО «Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера» Минздрава России, e-mail: adselin13@gmail.com;

Терехин Георгий Анатольевич, доктор мед. наук, проф., зав. каф. экстремальной медицины и товароведения ФГБОУ ВО «Пермская государственная фармацевтическая академия» Минздрава России, e-mail: terehin-ga@yandex.ru