

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОНИЦАЕМОСТЬ ЭРИТРОЦИТАРНЫХ МЕМБРАН И СОДЕРЖАНИЕ АЦЕТАТА СВИНЦА В ТКАНЯХ ГОЛОВНОГО МОЗГА И МИОКАРДА КРЫС

Терехина Н.А.¹, Терехин Г.А.², Селин А.Д.¹, Орбиданс А.Г.², Гуляев Д.К.²

¹ *ФГБОУ ВО «Пермский государственный медицинский университет имени академика Е.А. Вагнера» Минздрава России, г. Пермь, РФ*

² *ФГБОУ ВО «Пермская государственная фармацевтическая академия» Минздрава России, г. Пермь, РФ*

Резюме. Широкое использование сотовой связи формирует новый экологический фактор – «электромагнитный смог», обладающий широким спектром биологической активности деструктивного характера.

Цель работы – оценить влияние электромагнитного излучения на проницаемость эритроцитарных мембран и содержание ацетата свинца в тканях головного мозга и миокарда крыс.

Материалы и методы. Животные контрольной группы не подвергались воздействию изучаемых факторов. Животным группы сравнения вводили однократно внутривенно водный раствор ацетата свинца в дозе 1,0 мг/кг. Опытной группе животных после 60-суточного нахождения в электромагнитном поле вводили внутривенно, однократно водный раствор ацетата свинца из расчета 1,0 мг/кг и облучали еще в течение 30 суток.

Результаты. Увеличение проницаемости мембран эритроцитов было установлено при длительном воздействии электромагнитного излучения в течении 3 месяцев на модели *in vivo* и при кратковременной 90-минутной экспозиции на модели *in vitro*. Содержание свинца в тканях головного мозга и миокарда крыс, которые подвергались сочетанному воздействию электромагнитного излучения дециметрового диапазона на фоне отравления ацетатом свинца, оказалось в 3,5 раза выше, чем у крыс группы сравнения,

которым также вводили однократно раствор ацетата свинца без воздействия электромагнитного излучения.

Заключение. Электромагнитное излучение повышает проницаемость эритроцитарных мембран периферической крови крыс, что приводит к увеличению содержания ацетата свинца в тканях головного мозга и миокарда.

Ключевые слова: электромагнитное излучение; проницаемость эритроцитарных мембран; свинец; головной мозг; миокард

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

**THE EFFECT OF ELECTROMAGNETIC RADIATION ON
ERYTHROCYTE MEMBRANE PERMEABILITY AND THE LEAD
ACETATE CONTENT IN RAT BRAIN AND MYOCARDIAL TISSUES**

Terekhina N.A.¹, Terekhin G.A.², Selin A.D.¹, Orbidans A.G.², Guljaev D.K.²

¹*Vagner Perm State Medical University, Perm, Russian Federation*

²*Perm State Pharmaceutical Academy, Perm, Russian Federation*

Abstract. The widespread use of cellular communication creates a novel environmental factor – «electromagnetic smog» – which possesses a broad spectrum of destructive biological activity.

Objective. To evaluate the influence of electromagnetic radiation on erythrocyte membrane permeability and the content of lead acetate in rat brain and myocardial tissues.

Materials and Methods. The control group was not exposed to the factors under study. The comparison group received a single intragastric dose of lead acetate solution (1,0 mg/kg). The animals in the experimental group were intragastrically administered a single dose of an aqueous lead acetate solution (1,0 mg/kg) after a 60-day exposure to the electromagnetic field (EMF) and were then subjected to further EMF exposure for an additional 30 days.

Results. Increased permeability of erythrocyte membranes was observed both after 3 months of prolonged EMR exposure in an in vivo model and after a short-term 90-minute exposure in an in vitro model. The lead content in the brain and myocardial tissues of rats subjected to combined exposure to decimeter-range EMR and lead acetate poisoning was 3,5 times higher than in the comparison group, which received lead acetate without EMR exposure.

Conclusion. Electromagnetic radiation increases the permeability of erythrocyte membranes in rat peripheral blood, leading to elevated lead acetate levels in brain and myocardial tissues.

Keywords: electromagnetic radiation; erythrocyte membrane permeability; lead; brain; myocardium

For correspondence: Terekhina Natalya Aleksandrovna, terekhina@list.ru

Введение. Электромагнитное излучение (ЭМИ), генерируемое мобильными устройствами — это уникальный источник, которому нет аналога по абсолютному охвату населения [1]. Интенсивная эксплуатация средств сотовой связи существенно модифицирует общий электромагнитный фон, рассматривается как значимый фактор антропогенного загрязнения, потенциально ассоциированный с канцерогенным риском для здоровья популяции [2, 3]. Особую опасность ЭМИ представляет для детей и беременных женщин, так как еще не сформировавшийся детский организм обладает повышенной чувствительностью [4]. Головной мозг детей - критическая мишень для действия ЭМИ, генерируемого средствами мобильной связи [5]. Продолжительное воздействие электромагнитного поля (ЭМП) на биологические объекты в условиях in vitro и in vivo интенсифицирует процессы свободнорадикального окисления с последующим развитием окислительного стресса [6], влияет на активность и содержание ферментативных и не ферментативных антиоксидантов [7, 8], приводит к деструктирующим изменениям в отношении клеточных мембран и гематоэнцефалического барьера (ГЭБ) [9, 28].

Свинец, являясь приоритетным политропным суперэкоотоксикантом 1 класса опасности [10, 11], вносит весомый вклад в структуру токсикологических и канцерогенных рисков для здоровья популяции [12-14], оказывает системное токсическое действие, обладая выраженной генотоксичностью и органоспецифичностью (нейро-, нефро-, гепатотоксичностью) [15, 16]. Широкое использование и добыча свинца в промышленных масштабах сопровождается значительным выбросом его в окружающую среду, позволяет рассматривать свинец как значимый антропогенный фактор загрязнения, принимающий активное участие в формировании ксенобиотического профиля окружающей среды. На территории РФ свинец включен в число приоритетных химических загрязнителей [17, 18]. Изменения в ГЭБ при действии различных факторов окружающей среды могут способствовать избыточному накоплению тяжелых металлов в тканях головного мозга, что сопровождается развитием заболеваний нейродегенеративного генеза [19]. Нарушение целостности ГЭБ регистрируется даже при воздействии ЭМИ низкой интенсивности, сопоставимой с излучением современных мобильных устройств [20]. В экспериментальных работах на крысах, подвергавшихся воздействию ЭМИ дециметрового диапазона, было установлено увеличение проницаемости ГЭБ для таких молекул, как альбумин и сахара [21, 22].

Цель работы – оценить влияние электромагнитного излучения на проницаемость эритроцитарных мембран и содержание ацетата свинца в тканях головного мозга и миокарда крыс.

Материалы и методы исследования. Введение раствора ацетата свинца и облучение животных были проведены на базе токсикологической лаборатории ФГБОУ ВО «ПГФА». Биохимические исследования по оценке влияния ЭМИ на проницаемость эритроцитарных мембран были проведены в лаборатории кафедры биологической химии ФГБОУ ВО «ПГМУ им. академика Е.А. Вагнера». Исследование проведено на 120 самцах белых нелинейных крыс массой 150–220 г. Животные содержались в стандартных условиях вивария с

обеспечением свободного доступа к пище и воде в клетках, изготовленных из радиопрозрачного материала «Plexiglas» (по 10 особей в каждой). Для моделирования ситуации с частым воздействием ЭМП была спроектирована модель облучения на животных со следующими характеристиками: частота 1745 МГц, экспозиция 170 мин/сут, фракциями по 30 секунд в режиме дозвона. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭЭ) подбирали экспериментальным методом. Экспериментальная установка включала специально сконструированный каркас, который позволял устанавливать и производить настройку параметров электромагнитного воздействия в необходимой пространственной проекции. Генераторами электромагнитных волн дециметрового диапазона служили телефоны сотовой связи. Управление режимом работы мобильных телефонов, включая генерацию исходящих вызовов и контроль мощности, осуществляла автоматизированная система на базе модуля-генератора — виртуальной автоматической телефонной станции (АТС). Сконструированная модель позволяла дистанционно задавать и контролировать параметры ЭМП в течение всего эксперимента. В эксперименте уровень создаваемой электромагнитной нагрузки соответствовал предельному допустимому уровню энергетической экспозиции ($200 \text{ мкВт/см}^2/\text{ч}$), установленному гигиеническими нормативами РФ. Продолжительность ежедневного воздействия ЭМИ составляла 6–7 часов, что моделирует условия стандартного рабочего дня. Для расчёта величины ППЭЭ применяли измеритель ПЗ-33М (ООО «НТМ-Защита», Россия, г. Москва). Животные в 4-х недельном возрасте были разделены на 3 группы по 10 особей в каждой. Контрольная группа ($n=10$) включала интактных крыс, которые находились в помещении вивария и не подвергались воздействию изучаемых факторов (электромагнитное облучение и отравление свинцом). Животным группы сравнения ($n=10$) вводили однократно внутрижелудочно водный раствор ацетата свинца в субтоксической дозе 1,0 мг/кг. Животным опытной группы ($n=10$) внутрижелудочно вводили ацетат свинца в дозе 1,0 мг/кг после 60-суточного нахождения в поле ЭМИ. После введения яда животные в течение

ещё 30 суток продолжали находиться в ЭМП. Для определения содержания свинца животных выводили из эксперимента декапитацией под эфирным наркозом и производили забор образцов тканей головного мозга и миокарда. Отобранные биологические образцы тканей подвергали сухому озолению в муфельной печи в течение 10 часов при температуре 600°C. Содержание свинца в зольном остатке определяли методом энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектроскопии с использованием прибора QUANT'X (Thermo Scientific, США).

Проницаемость эритроцитарных мембран при электромагнитном излучении на модели in vitro. Пробы крови, полученные от здоровых интактных крыс, подвергали облучению на частоте 1745 МГц в течение 30, 60 и 90 минут при ППЭЭ - 200 мкВт/см²/ч. В качестве контроля была использована кровь животных (n=10), которая не подвергалась воздействию ЭМИ. В экспериментах in vitro для достижения однородности электромагнитной экспозиции применялась программа «Auto Redial».

Проницаемость эритроцитарных мембран при электромагнитном излучении на модели in vivo. При изучении продолжительного воздействия ЭМИ на проницаемость эритроцитарных мембран из животных были сформированы две группы: контрольная (n=20) и опытная (n=60). Крысы контрольной группы находились в изолированном помещении и не подвергались воздействию электромагнитного облучения. Животные опытной группы (n=60) находились в условиях постоянного воздействия ЭМП от 1 до 3 месяцев. Полученную при декапитации животных гепаринизированную кровь в объеме 1,0 мл, центрифугировали (3000 об/мин, 10 мин). Плазму удаляли, а осажденные эритроциты трижды отмывали при помощи 0,9% раствора NaCl в объеме 2,0 мл. Для оценки проницаемости мембран использовали метод, основанный на индукции гемолиза в средах с различным осмотическим давлением, создаваемым комбинациями изотонических растворов NaCl и мочевины. Интенсивность гемолиза эритроцитов определяли спектрофотометрически по

оптической плотности супернатанта при длине волны 540 нм на приборе PD-303 (Arel, Япония).

Статистический анализ результатов исследования проводили в программах Statistica 10.0. (Stat Soft) и Microsoft Excel 2024. С помощью расчета критерия Шапиро–Уилка определяли характер распределения данных. Для описания данных с нормальным распределением рассчитывали среднее (M) и ошибку среднего (m). Статистическую значимость различий между группами оценивали с использованием t -критерия Стьюдента для независимых выборок, принимая уровень значимости $p < 0,05$. В случае отклонения распределения от нормального применяли непараметрический U -критерий Манна–Уитни.

Результаты исследования. В ткани головного мозга интактных крыс содержание ацетата свинца составило $0,17 \pm 0,04$ мкг/г (табл. 1). После однократного внутрижелудочного введения раствора ацетата свинца в дозе 1,0 мг/кг содержание свинца в ткани головного мозга крыс повысилось почти в 2 раза. Содержание свинца в ткани мозга крыс опытной группы, которым после 2 месяцев нахождения в условиях воздействия ЭМИ вводили внутрижелудочно однократно раствор ацетата свинца и продолжали облучать еще в течение 1 месяца, оказалось в 3,5 раза выше ($p_1 < 0,028$), чем у крыс группы сравнения и в 7 раз выше ($p < 0,007$), чем у животных контрольной группы (табл. 1).

В миокарде интактных крыс содержание свинца составило $0,39 \pm 0,13$ мкг/г (табл. 2). Однократное внутрижелудочное введение раствора ацетата свинца в дозе 1,0 мг/кг привело к увеличению содержания свинца в миокарде крыс в 1,5 раза. Содержание свинца в миокарде крыс, находившихся под действием ЭМИ в течение 2 месяцев, которым однократно внутрижелудочно вводили раствор ацетата свинца (1,0 мг/кг) и продолжали облучать еще в течение 1 месяца оказалось практически в 3,5 раза выше ($p < 0,026$), чем у крыс группы сравнения и более чем в 5 раз выше ($p < 0,01$), чем у интактных животных (табл. 2).

Таблица 1

**Влияние электромагнитного излучения на содержание свинца в ткани
головного мозга крыс ($M \pm m$)**

Группы животных	Содержание свинца, мкг/г ($M \pm m$)	p	p ₁
Контрольная группа (интактные крысы)	0,17±0,04	-	-
Группа сравнения (ацетат свинца)	0,35±0,07*	0,045	-
Опытная группа (ЭМИ + ацетат свинца)	1,23±0,34*/**	0,007	0,028

Примечание. ЭМИ – электромагнитное излучение. * – статистически значимые различия ($p < 0,05$) с группой интактных животных. ** – статистически значимые различия ($p_1 < 0,05$) с группой сравнения.

Таблица 2

**Влияние электромагнитного излучения на содержание свинца в миокарде
крыс ($M \pm m$)**

Группы животных	Содержание свинца, мкг/г ($M \pm m$)	p	p ₁
Контрольная группа (интактные крысы)	0,39±0,13	-	-
Группа сравнения (ацетат свинца)	0,6±0,22	0,4	-
Опытная группа (ЭМИ + ацетат свинца)	2,06±0,56*/**	0,01	0,026

Примечание. ЭМИ – электромагнитное излучение. * – статистически значимые различия ($p < 0,05$), с группой интактных животных. ** – статистически значимые различия ($p_1 < 0,05$), с группой сравнения.

При отравлениях соединениями свинца в организме резко нарушаются окислительно-восстановительные процессы, угнетается синтез гемоглобина и увеличивается проницаемость ГЭБ и эритроцитарных мембран [23-26]. Эритроцит – удобная и доступная модель для изучения воздействия деструктирующих факторов окружающей среды, в том числе ЭМИ, на клеточные мембраны [27]. Целостность мембраны эритроцита является критическим фактором поддержания гомеостаза и регуляции биохимических

процессов. Для оценки действия ЭМИ на биологические мембраны использовали определение проницаемости эритроцитарных мембран на моделях *in vivo* и *in vitro*. Гемолиз эритроцитов в контрольной и опытной группах наступал при концентрации мочевины 0,300 ммоль/л (табл. 3, 4).

Согласно полученным результатам исследования, повышение проницаемости эритроцитарных мембран периферической крови крыс регистрировалось через 90 минут после воздействия ЭМИ при концентрации мочевины 0,165 ммоль/л. Установлено, что проницаемость эритроцитарных мембран крыс повышается на 23% по сравнению с показателями контрольной группы животных (табл. 3).

Таблица 3

Проницаемость эритроцитарных мембран крови крыс в условиях *in vitro* (%) при электромагнитном облучении дециметрового диапазона ($M \pm m$)

Концентрация мочевины (ммоль/л)								
Исследуемая группа (in vitro)	n	0,120	0,135	0,150	0,165	0,180	0,195	0,300
Контрольная группа (кровь интактных крыс)	10	5,2 ±1,3	18,4 ±2,3	38,2 ±3,5	53,9 ±4,2	78,6 ±4,8	92,6 ±2,9	100,0 ±0,0
Опытная группа (ЭМИ - 30 минут)	10	5,4 ±0,9	19,9 ±2,7	39,3 ±4,2	54,8 ±5,3	80,3 ±4,5	97,3 ±2,2	100,0 ±0,0
Опытная группа (ЭМИ - 60 минут)	10	6,2 ±1,6	22,7 ±2,4	44,3 ±4,3	58,7 ±4,6	88,1 ±4,4	100,0 ±0,0*	100,0 ±0,0
Опытная группа (ЭМИ - 90 минут)	10	6,8 ±1,3	24,4 ±4,3	48,5 ±4,7	69,8 ±5,5*	97,4 ±2,6*	100,0 ±0,0*	100,0 ±0,0

Примечание: * - при $p < 0,05$ достоверность различий по сравнению с контролем.

Установленные *in vitro* нарушения проницаемости эритроцитарных мембран послужили основанием для исследования влияния ЭМИ в условиях *in vivo* на экспериментальных животных. Ранее нами было показано, что при длительном воздействии ЭМИ (в течение 3 месяцев) достоверно увеличивается проницаемость мембран эритроцитов периферической крови при концентрации мочевины 0,150 ммоль/л (табл. 4) [28]. В таблице 4 представлены результаты по

изучению проницаемости эритроцитарных мембран крови крыс при ЭМИ в течение 3-месячного периода на модели *in vivo*.

Таблица 4

**Проницаемость эритроцитарных мембран крови крыс (%) при
электромагнитном облучении дециметрового диапазона ($M \pm m$)**

Концентрация мочевины (ммоль/л)								
Исследуемая группа (<i>in vivo</i>)	n	0,120	0,135	0,150	0,165	0,180	0,195	0,300
Контрольная группа (интактные крысы)	20	3,8 $\pm 0,3$	10,1 $\pm 0,6$	28,7 $\pm 0,8$	59,2 $\pm 1,4$	77,0 $\pm 1,3$	93,8 $\pm 1,2$	100,0 $\pm 0,0$
Опытная группа (ЭМИ - 1 месяц)	20	3,9 $\pm 0,4$	10,2 $\pm 0,5$	29,3 $\pm 0,7$	60,5 $\pm 1,6$	78,2 $\pm 1,5$	95,4 $\pm 1,7$	100,0 $\pm 0,0$
Опытная группа (ЭМИ - 2 месяца)	20	4,2 $\pm 0,4$	10,4 $\pm 0,6$	30,5 $\pm 0,8$	60,9 $\pm 1,5$	80,3 $\pm 1,6$	97,6 $\pm 1,7$	100,0 $\pm 0,0$
Опытная группа (ЭМИ - 3 месяца)	20	4,8 $\pm 0,4$	10,7 $\pm 0,8$	34,6 $\pm 1,1^*$	63,8 $\pm 0,9^*$	83,3 $\pm 1,3^*$	98,1 $\pm 0,6^*$	100,0 $\pm 0,0$

Примечание: * - при $p < 0,05$ достоверность различий по сравнению с контролем.

Обсуждение. Сочетанное воздействие отравления свинцом в субтоксической дозе (1,0 мг/кг) на фоне продолжительного воздействия ЭМИ дециметрового диапазона проявляет потенцирующий эффект в отношении тканей головного мозга и миокарда. Органы и ткани, обладающие наибольшей степенью гидратации (сердце, головной мозг, эритроциты) наиболее восприимчивы к воздействию ЭМИ. Вода, обладая высокой диэлектрической проницаемостью, под действием ЭМП подвергается переменной поляризации и вызывает нагрев тканей. Кроме того, ЭМИ может разрушать надмолекулярные структуры воды, нарушая метаболизм, а также заставляет заряженные и дипольные молекулы колебаться и вращаться с частотой приложенного ЭМП [29]. Продолжительное использование мобильных телефонов – генераторов электромагнитных волн дециметрового диапазона дестабилизирует работу проводящей системы сердца посредством совпадения частоты электромагнитных импульсов с собственной частотой сердечного ритма [30,

31]. Изучение молекулярных механизмов первичной рецепции ЭМИ с молекулами воды позволяет выдвинуть гипотезу о том, что следующей мишенью являются белковые молекулы (ферменты, гормоны, низкомолекулярные пептиды). В эксперименте установлено, что глутатион, церулоплазмин, фермент гамма-глутамилтрансептидаза служат мишенью для действия ЭМИ дециметрового диапазона [8, 32]. Ввиду ключевой роли мембранных структур, целостность которых определяет характер распределения внутри- и внеклеточных метаболитов, биологические мембраны и барьеры рассматриваются в качестве первичного «сенсора - детектора» для действия ЭМИ дециметрового диапазона. Продолжительное нахождение в условиях воздействия ЭМИ повышает проницаемости ГЭБ для различных веществ [9], даже при низкоинтенсивном воздействии, аналогичном генерируемому мобильными телефонами [21], что опосредует накопление в ткани мозга тяжелых металлов и может ускорить развитие нейродегенеративных процессов [33].

Применение комплексного подхода к оценке рисков, связанных с сочетанным воздействием различных факторов антропогенного генеза, позволит не только выявить уязвимые группы населения, но и разработать стратегии минимизации негативного влияния ЭМИ дециметрового диапазона.

Заключение. Электромагнитное излучение повышает проницаемость эритроцитарных мембран периферической крови крыс, что приводит к увеличению содержания ацетата свинца в тканях головного мозга и миокарда.

Список литературы

1. Григорьев Ю.Г., Григорьев О.А. *Сотовая связь и здоровье: Электромагнитная обстановка. Радиобиологические и гигиенические проблемы. Прогноз опасности.* М.: Экономика; 2016.
2. Григорьев О.А., Григорьев Ю.Г. Электромагнитное поле сотовых телефонов как возможный канцероген – к оценке риска воздействия. *Бюллетень медицинских Интернет-конференций.* 2012; 2(6): 461-465.

3. Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., El Ghissassi F., et al. On behalf of the WHO International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *Lancet Oncol.* 2011; 12(7): 624-626. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(11)70147-4)
4. Григорьев Ю.Г., Самойлов А.С., Бушманов А.Ю., и др. Мобильная связь и здоровье детей: проблема третьего тысячелетия. *Медицинская радиология и радиационная безопасность.* 2017; 62(2): 39-46. https://doi.org/10.12737/article_58f0b9573b6b59.54629416
5. Morgan L.L., Kesari S., Davis D.L. Why children absorb more microwave radiation than adults: The consequences. *J Microsc Ultrastruct.* 2014; 2: 197-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmau.2014.06.005>
6. Kivrak E.G., Yurt K.K., Kaplan A.A., et al. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J Microsc Ultrastruct.* 2017; 5(4): 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003>
7. Dasdag S., Akdag M.Z., Ulukaya E., et al. Effect of mobile phone exposure on apoptotic glial cells and status of oxidative stress in rat brain. *Electromagn Biol Med.* 2009; 28(4): 342-354. <https://doi.org/10.3109/15368370903206556>
8. 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. <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2021.03.73-79>
9. Nittby H., Grafström G., Eberhardt J.L., et al. Radiofrequency and extremely low-frequency electromagnetic field effects on the blood-brain barrier. *Electromagn Biol Med.* 2008; 27(2): 103-126. <https://doi.org/10.1080/15368370802061995>
10. Федеральный регистр потенциально опасных химических и биологических веществ НИИЦ РПОХБВ ФБУН «ФНЦГ им. Ф.Ф. Эрисмана» Роспотребнадзора. <https://web.archive.org/web/20201113130511/http://www.rpohv.ru/online/detail.html?id=3714>

11. WHO. Lead poisoning and health. Geneva, October 22-28, 2023. Geneva; 2023. <https://www.who.int/campaigns/international-lead-poisoning-prevention-week/2023>
12. Савченко О.В. Влияние загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами на здоровье детей дошкольного возраста. *Экология человека*. 2018; 3: 16-20.
13. Кашуро В.А., Великова В.Д. Отравления металлами. В кн. Карпищенко А.И. *Медицинская лабораторная диагностика: программы и алгоритмы: руководство для врачей*. М.: ГЕОТАР-Медиа; 2023: 294-314.
14. Ширяева И.А., Попова Е.В. Тяжелые металлы в питьевых водах различных природных геохимических провинций Пермского края как факторы канцерогенного риска для здоровья населения. *Вестник ПГУ. Биология*. 2014; 4: 89-96.
15. Minigalieva I.A., Shtin T.N., Makeyev O.H., et al. Some outcomes and a hypothetical mechanism of combined lead and benzo(a)pyrene intoxication, and its alleviation with a complex of bioprotectors. *Toxicology reports*. 2020; 12(7): 986-994. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.004>
16. Скугорева С.Г., Ашихмина Т.Я., Фокина А.И., и др. Химические основы токсического действия тяжёлых металлов (обзор). *Теоретическая и прикладная экология*. 2016; (1): 4-13.
17. Ильичева С.А., Заридзе Д.Г. Современное состояние оценки потенциальной канцерогенной опасности свинца и его соединений. *Здравоохранение РФ*. 2015; 59(2): 48-52.
18. Государственный доклад Роспотребнадзора «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Российской Федерации в 2022 году»: Государственный доклад. М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека; 2023. <https://www.rospotrebnadzor.ru/>

19. Grandjean P., Landrigan P.J. Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *Lancet Neurol.* 2014; 13(3): 330-338. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70278-3)
20. Трибрат Н.С., Чуян Е.Н., Раваева М.Ю. Влияние электромагнитных излучений различного диапазона на процессы микроциркуляции. *Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия.* 2009; 22(4): 182-201.
21. Salford L.G., Brun A.E., Eberhardt J.L., et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect.* 2003; 111(7): 881-3. <https://doi.org/10.1289/ehp.6039>
22. Schirmacher A., Winters S., Fischer S., et al. Electromagnetic fields (1.8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro. *Bioelectromagnetics.* 2000; 21(5): 338-345.
23. Новикова М.А., Пушкарев Б.Г., Судаков Н.П., и др. Влияние хронической свинцовой интоксикации на организм человека. *Сибирский медицинский журнал.* 2013; 2: 13-16.
24. Дзугкоев С.Г., Дзугкоева Ф.С., Маргиева О.И. Анализ механизмов токсичности свинца и их патогенетическая коррекция. *Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова.* 2022; 108(5): 626-635. <https://doi.org/10.31857/S0869813922050028>
25. de Souza I.D., de Andrade A.S., Dalmolin R.J.S. Lead-interacting proteins and their implication in lead poisoning. *Critical reviews in toxicology.* 2018; 48(5): 375-386.
26. Сутункова М.П., Никогосян К.М., Рябова Ю.В., и др. Современное представление о механизмах токсического действия свинца на центральную нервную систему (обзор литературы). *Медицина труда и экология человека.* 2023; 4: 196-215.
27. 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 медицина. 2007; 51(1): 6-8. <https://doi.org/10.20333/2500136-2017-6-69-76>

28. 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): 43-49. <https://doi.org/10.37279/2224-6444-2020-10-4-43-49>

29. Bernhardt J.H. Non-ionizing radiation safety: radiofrequency radiation, electric and magnetic fields. *Phys Med Biol*. 1992; 37(4): 807–844.

30. Ekici B., Tanındı A., Ekici G., et al. The effects of the duration of mobile phone use on heart rate variability parameters in healthy subjects. *Anatol J Cardiol*. 2016; 16(11): 833–838.

31. Oreshina M.N., Savenko E.Y. Studies of the effects of electromagnetic radiation on the human body. *Izvestia of TulGU. Technical Sciences*. 2021; 3: 342-347.

32. Терехина Н.А., Селин А.Д., Горячева О.Г., Терехин Г.А. Прогностическое значение определение активности гамма-глутамилтранспептидазы в плазме крови крыс при действии электромагнитного излучения. *Патологическая физиология и экспериментальная терапия*. 2023; 67(1): 79-86. <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2023.01.79-86>

33. Kim S., Jung U.J., Kim S.R. The Crucial Role of the Blood-Brain Barrier in Neurodegenerative Diseases: Mechanisms of Disruption and Therapeutic Implications. *J Clin Med*. 2025; 14(2): 386. <https://doi.org/10.3390/jcm14020386>

References

1. Grigoriev Y.G., Grigoriev O.A. Cellular Communication and Health: Electromagnetic Environment. Radiobiological and Hygienic Problems. Danger Forecast. Moscow: Ekonomika; 2016. (In Russian)

2. Grigoriev O.A., Grigoriev Y.G. Exposure to the risk assessment: EMF cell phones as a possible carcinogen. Bulletin of Medical Internet Conferences. 2012; 2(6): 461-465. (In Russian)

3. Baan R., Grosse Y., Lauby-Secretan B., El Ghissassi F., et al. On behalf of the WHO International Agency for Research on Cancer Monograph Working Group. Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *Lancet Oncol.* 2011; 12(7): 624-626. [https://doi.org/10.1016/s1470-2045\(11\)70147-4](https://doi.org/10.1016/s1470-2045(11)70147-4)
4. Grigoriev Y.G., Samoylov A.S., Bushmanov A.Y., et al. Cellular Connection and the Health of Children – Problem of the Third Millennium. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2017; 62(2): 39-46. (In Russian) https://doi.org/10.12737/article_58f0b9573b6b59.54629416
5. Morgan L.L., Kesari S., Davis D.L. Why children absorb more microwave radiation than adults: The consequences. *J Microsc Ultrastruct.* 2014; 2: 197-204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmau.2014.06.005>
6. Kivrak E.G., Yurt K.K., Kaplan A.A., et al. Effects of electromagnetic fields exposure on the antioxidant defense system. *J Microsc Ultrastruct.* 2017; 5(4): 167-176. <https://doi.org/10.1016/j.jmau.2017.07.003>
7. Dasdag S., Akdag M.Z., Ulukaya E., et al. Effect of mobile phone exposure on apoptotic glial cells and status of oxidative stress in rat brain. *Electromagn Biol Med.* 2009; 28(4): 342-354. <https://doi.org/10.3109/15368370903206556>
8. 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. *Pathological Physiology and Experimental Therapy.* 2021; 65(3): 73-79. (In Russian) <https://doi.org/10.25557/0031-2991.2021.03.73-79>
9. Nittby H., Grafström G., Eberhardt J.L., et al. Radiofrequency and extremely low-frequency electromagnetic field effects on the blood-brain barrier. *Electromagn Biol Med.* 2008; 27(2): 103-126. <https://doi.org/10.1080/15368370802061995>
10. Federal Register of Potentially Hazardous Chemical and Biological Substances (NIAZ RPO KhBV). Moscow: Federal Scientific Center for Hygiene named after F.F. Erisman, Rospotrebnadzor. (In Russian) <https://web.archive.org/web/20201113130511/http://www.rpohv.ru/online/detail.html?id=3714>

11. WHO. Lead poisoning and health. Geneva, October 22-28, 2023. Geneva; 2023. <https://www.who.int/campaigns/international-lead-poisoning-prevention-week/2023>
12. Savchenko O.V. Environmental Heavy Metals Pollution Effect on Preschool Children's Health. *Human Ecology*. 2018; 3: 16-20. (In Russian)
13. Kashuro V.A., Velikova V.D. Metal poisoning. In: Karpishhenko A.I. *Medical laboratory diagnostics: programs and algorithms: a guide for doctors*. Moscow: GJeOTAR-Media, 2023; 294-314. (In Russian)
14. Shiryaeva I.A., Popova E.V. Heavy metals in drinking water on geochemical provinces in the Perm region as factors of carcinogenic risk to protect public health. *Bulletin of PSU. Biology*. 2014; 4: 89-96. (In Russian)
15. Minigalieva I.A., Shtin T.N., Makeyev O.H., et al. Some outcomes and a hypothetical mechanism of combined lead and benzo(a)pyrene intoxication, and its alleviation with a complex of bioprotectors. *Toxicology reports*. 2020; 12(7): 986-994. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2020.08.004>
16. Skugoreva S.G., Ashihmina T.Ya., Fokina A.I., et al. Chemical grounds of toxic effect of heavy metals (review). *Theoretical and Applied Ecology*. 2016; (1): 4-13. (In Russian)
17. Ilicheva S.A., Zaridze D.G. The Actual Condition of Problem of Evaluation of Potential Carcinogenic Danger of Lead and Its Compounds. *Zdravookhraneniye Rossiyskoy Federatsii*. 2015; 59(2): 48-52. (In Russian)
18. State Report of Rospotrebnadzor «On the State of Sanitary and Epidemiological Wellbeing of the Population in the Russian Federation in 2022»: State Report. Moscow: The Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Wellbeing; 2023. (In Russian) <https://www.rospotrebnadzor.ru/>
19. Grandjean P., Landrigan P.J. Neurobehavioural effects of developmental toxicity. *Lancet Neurol*. 2014; 13(3): 330-338. [https://doi.org/10.1016/S1474-4422\(13\)70278-3](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(13)70278-3)

20. Tribat N.S., Chuyan E.N., Ravaeva M.Yu. Influence electromagnetic fields different ranges on processes of microcirculation. *Scientific Notes of Taurida V.Vernadsky National University. Series: Biology, chemistry*. 2009; 22(4): 182-201. (In Russian)
21. Salford L.G., Brun A.E., Eberhardt J.L., et al. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones. *Environ Health Perspect*. 2003; 111(7): 881-3. <https://doi.org/10.1289/ehp.6039>
22. Schirmacher A., Winters S., Fischer S., et al. Electromagnetic fields (1.8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro. *Bioelectromagnetics*. 2000; 21(5): 338-345.
23. Novikova M.A., Pushkarev B.G., Sudakov N.P., et al. The Effect of Persistent Lead Intoxication on Human Organism. *Siberian Medical Journal*. 2013; 2: 13-16. (In Russian)
24. Dzugkoev S.G., Dzugkoeva F.S., Margieva O.I. Analysis of the Mechanisms of Lead Toxicity and Their Pathogenetic Correction. *Sechenov Physiological Journal*. 2022; 108(5): 626-635. (In Russian) <https://doi.org/10.31857/S0869813922050028>
25. de Souza I.D., de Andrade A.S., Dalmolin R.J.S. Lead-interacting proteins and their implication in lead poisoning. *Critical reviews in toxicology*. 2018; 48(5): 375-386.
26. Sutunkova M.P., Nikogosyan K.M., Ryabova Yu.V., et al. Current Understanding of The Mechanisms of Lead Toxic Effects on The Central Nervous System (Literature Review). *Occupational Medicine and Human Ecology*. 2023; 4: 196-215. (In Russian)
27. Terekhina N.A., Zorin M.G, Terekhin G.A. Effect of sapropel muds on the parameters of oxidative stress and antioxidative defense in acute carbofos poisoning. *Pathological Physiology and Experimental Therapy*. 2007; 51(1): 6-8. (In Russian) <https://doi.org/10.20333/2500136-2017-6-69-76>
28. Selin A.D., Terekhina N.A., Terekhin G.A. Influence of electromagnetic radiation on the permeability of erythrocyte membranes. *Crimean Journal of*

Experimental and Clinical Medicine. 2020; 10(4): 43-9. (In Russian)
<https://doi.org/10.37279/2224-6444-2020-10-4-43-49>

29. Bernhardt J.H. Non-ionizing radiation safety: radiofrequency radiation, electric and magnetic fields. *Phys Med Biol*. 1992; 37(4): 807–844.

30. Ekici B., Tanındı A., Ekici G., et al. The effects of the duration of mobile phone use on heart rate variability parameters in healthy subjects. *Anatol J Cardiol*. 2016; 16(11): 833–838.

31. Oreshina M.N., Savenko E.Y. Studies of the effects of electromagnetic radiation on the human body. *Izvestia of TulGU. Technical Sciences*. 2021; 3: 342-347.

32. Terekhina N.A., Selin A.D., Goryacheva O.G., Terekhin G.A. The prognostic value of determining the activity of gamma-glutamyltranspeptidase in the blood plasma of rats under the action of electromagnetic radiation. *Pathological Physiology and Experimental Therapy*. 2023; 67(1): 79-86. (In Russian).
<https://doi.org/10.25557/0031-2991.2023.01.79-86>

33. Kim S., Jung U.J., Kim S.R. The Crucial Role of the Blood-Brain Barrier in Neurodegenerative Diseases: Mechanisms of Disruption and Therapeutic Implications. *J Clin Med*. 2025; 14(2): 386. <https://doi.org/10.3390/jcm14020386>