

# Медико-биологические проблемы жизнедеятельности

Научно-практический рецензируемый журнал

№ 2(32)

2024 г.

## Учредитель

Государственное учреждение  
«Республиканский научно-  
практический центр  
радиационной медицины  
и экологии человека»

## Журнал включен в

Перечень научных изданий  
Республики Беларусь  
для опубликования  
диссертационных исследований  
по медицинской и биологической  
отраслям науки  
(31.12.2009, протокол 25/1)

## Журнал зарегистрирован

Министерством информации  
Республики Беларусь,  
Свид. № 762 от 6.11.2009

Подписано в печать 27.09.24  
Формат 60×90/8. Бумага мелованная.  
Гарнитура «Times New Roman».  
Печать цифровая. Тираж 120 экз.  
Усл. печ. л. 21,25. Уч.-изд. л. 12,94.  
Зак. 524.

Издатель ГУ «Республиканский  
научно-практический центр  
радиационной медицины  
и экологии человека»  
Свидетельство N 1/410 от 14.08.2014

Отпечатано в  
КУП «Редакция газеты  
«Гомельская праўда»  
г. Гомель, ул. Полесская, 17а

ISSN 2074-2088

## Главный редактор,

### председатель редакционной коллегии

А.В. Рожко (д.м.н., профессор)

### Редакционная коллегия

В.С. Аверин (д.б.н., профессор, зам. гл. редактора),  
В.В. Аничкин (д.м.н., профессор), В.Н. Беляковский (д.м.н.,  
профессор), К.Н. Буздакин (к.т.н., доцент), Н.Г. Власова (д.б.н.,  
профессор, научный редактор), А.В. Величко (к.м.н., доцент),  
И.В. Веякин (к.б.н., доцент), Н.Н. Веякина (к.б.н., отв.  
секретарь), А.В. Воропаева (к.б.н., доцент), Д.И. Гавриленко  
(к.м.н.), М.О. Досина (к.б.н., доцент), А.В. Жарикова (к.м.н.),  
С.В. Зыблева (д.м.н., доцент), С.А. Игумнов (д.м.н., профессор),  
А.В. Коротаяев (к.м.н., доцент), А.Н. Лызинов (д.м.н., профессор),  
А.В. Макарич (к.м.н., доцент), С.Б. Мельнов (д.б.н., профессор),  
В.М. Мицура (д.м.н., доцент), Я.Л. Навменова (к.м.н.,  
доцент), Э.А. Надыров (к.м.н., доцент), И.А. Новикова (д.м.н.,  
профессор), Э.Н. Платошкин (к.м.н., доцент), Э.А. Повелица  
(к.м.н.), А.С. Подгорная (к.м.н.), Ю.И. Рожко (к.м.н., доцент),  
И.П. Ромашевская (к.м.н.), А.П. Саливончик (к.б.н.), А.Е. Силин  
(к.б.н., доцент), А.Н. Стожаров (д.б.н., профессор), И.О. Стома  
(д.м.н., профессор), Н.И. Шевченко (к.б.н., доцент), Ю.И. Ярец  
(к.м.н., доцент)

### Редакционный совет

А.В. Аклеев (д.м.н., профессор, Челябинск), О.В. Алейникова  
(д.м.н., чл.-кор. НАН РБ, Минск), С.С. Алексанин (д.м.н.,  
профессор, Санкт-Петербург), Е.Л. Богдан (Минск),  
Л.А. Бокерия (д.м.н., академик РАН и РАМН, Москва),  
А.Ю. Бушманов (д.м.н., профессор, Москва), И.И. Дедов  
(д.м.н., академик РАМН, Москва), В.И. Жарко (Минск),  
К.В. Котенко (д.м.н., профессор, Москва), В.Ю. Кравцов  
(д.б.н., профессор, Санкт-Петербург), Е.Н. Кроткова (к.м.н.,  
доцент, Минск), Н.Г. Кручинский (д.м.н., профессор, Пинск),  
Т.В. Мохорт (д.м.н., профессор, Минск), Д.Л. Пиневиц (Минск),  
В.Ю. Рыбников (д.м.н., профессор, Санкт-Петербург), А.Л. Усс  
(д.м.н., профессор, Минск), В.А. Филонюк (д.м.н., профессор,  
Минск), Р.А. Часнойть (к.э.н., Минск), В.Д. Шило (Минск)

### Технический редактор

С.Н. Никонович

### Корректор

Н.Н. Юрченко

**Адрес редакции** 246040 г. Гомель, ул. Ильича, д. 290,  
ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», редакция журнала  
тел (0232) 38-95-00, факс (0232) 37-80-97  
<http://www.mbp.rcrm.by> e-mail: [mbp@rcrm.by](mailto:mbp@rcrm.by)

© Государственное учреждение  
«Республиканский научно-практический центр  
радиационной медицины и экологии человека», 2024

№ 2(32)

2024

# Medical and Biological Problems of Life Activity

Scientific and Practical Journal

## **Founder**

Republican Research Centre  
for Radiation Medicine  
and Human Ecology

Journal registration  
by the Ministry of information  
of Republic of Belarus

Certificate № 762 of 6.11.2009

© Republican Research Centre  
for Radiation Medicine  
and Human Ecology

**ISSN 2074-2088**

**Обзоры и проблемные статьи**

**А.В. Рожко, С.В. Зыблева, А.В. Жарикова,  
В.М. Мицура, Н.Н. Багинская**

Роль государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр радиационной медицины и экологии человека» в системе здравоохранения и перспективы его развития

7

**Э.В. Вист, А.В. Бойко, М.М. Селицкий**

Воспаление как движущая сила нейродегенерации. Основы персонализированной диагностики и лечения (обзор литературы)

15

**Ж.М. Козич, В.Н. Мартинков, Н.Н. Климович,  
Т.В. Руденкова, С.А. Костюк,  
Н.В. Сердюкова**

Новые подходы в диагностике и терапии множественной миеломы (обзор литературы)

23

**Н.И. Тимофеева, Е.Г. Жук**

Оценка жесткости паренхимы почечного аллотрансплантата сдвиговой волновой соноэластографией (обзор литературы)

29

**Медико-биологические проблемы**

**Т.Э. Владимирская, И.Э. Адзериho,  
А.М. Устемчук**

Оценка эндотелиального апоптоза в легочных артериях крыс с монокроталин-индуцированной легочной артериальной гипертензией

37

**Н.Г. Власова, К.Н. Буздалькин, Л.Н. Эвентова,  
А.Н. Матарас, Г.Н. Евтушкова,  
Д.Б. Куликович**

Реконструкция индивидуализированных доз внутреннего облучения в условиях неопределенности и неполных данных СИЧ-измерений

44

**Д.Б. Куликович**

Сравнительный анализ методов реконструкции индивидуализированных доз внешнего облучения населения, проживающего на радиоактивно-загрязненной территории

50

**Reviews and problem articles**

**A.V. Rozhko, S.V. Zybleva, A.V. Zharikova,  
V.M. Mitsura, N.N. Baginskaya**

The role of state institution «Republican research center for radiation medicine and human ecology» in the healthcare system and its development prospects

**E.V. Vist, A.V. Boika, M.M. Sialitski**

Inflammation as a driving force of neurodegeneration. Fundamentals of personalized diagnostics and treatment

**Zh.M. Kozich, V.N. Martinkov, N.N. Klimovich,  
T.V. Rudenkova, S.A. Kostyuk,  
N.V. Serdyukova**

New approaches in the diagnosis and treatment of multiple myeloma (review)

**N.I. Timofeeva, E.G. Zhuk**

Shear wave ultrasound elastography in assessing the stiffness of the renal allograft parenchyma (literature review)

**Medical-biological problems**

**T.Ye. Vladimirskaja, I.Ye. Adzeriho,  
A.M. Ustemchuk**

Assessment of endothelial apoptosis in the pulmonary arteries of rats with monocrotaline-induced pulmonary arterial hypertension

**N.G. Vlasova, K.N. Buzdalkin, L.N. Eventova,  
A.N. Mataras, G.N. Yevtushkova,  
D.B. Kulikovich**

Reconstruction of individualized radiation doses under conditions of uncertainty and incomplete of whole-body  $\gamma$ -spectrum analyzer measurement data

**D.B. Kulikovich**

Comparative analysis of methods for reconstruction of individualized external exposure doses to population living in a radioactively contaminated territory

- Е.В. Мартищенко, Н.Д. Пузан, Г.З. Гутцева, И.А. Чешик**  
 Результаты опроса респондентов Гомельской и Витебской областей относительно наиболее часто используемых в повседневной жизни устройств (видов связи) 58
- Е.К. Нилова, К.Н. Буздалкин**  
 Методология экспресс-оценки радиационной обстановки с применением мобильной лаборатории 65
- Т.В. Переволоцкая, А.Н. Переволоцкий**  
 Оценка радиационной обстановки и внешнего облучения работников лесного хозяйства при проведении работ в I и II зонах радиоактивного загрязнения 73
- Д.В. Чарнаштан, Ю.В. Бондарева, Ф.Н. Карпенко, М.П. Потапнев, Н.В. Чуешова, Н.Н. Веялкина, Н.Г. Мальцева, Э.А. Надыров, Д.А. Зиновкин, В.И. Николаев**  
 Доклиническая оценка эффективности интрамедуллярной биокompозитной костной пластики в ранние сроки после имплантации бесцементного бедренного компонента эндопротеза тазобедренного сустава у лабораторных крыс 79
- Н.В. Чуешова, В.М. Щемелев, Е.А. Щурова, И.А. Чешик**  
 Антиоксидантная система печени крыс-самцов на разных этапах онтогенеза в условиях хронического воздействия электромагнитного поля низкой интенсивности 87

### ***Клиническая медицина***

- А.Ю. Захарко, А.С. Подгорная, О.В. Мурашко, М.Ю. Жандаров, А.Р. Ромбальская**  
 Анализ случаев гладкомышечных опухолей матки с неопределенным злокачественным потенциалом (STUMP) в ГУ «РНПЦ радиационной медицины и экологии человека» 95

### ***Clinical medicine***

- A.Yu. Zaharko, A.S. Podgornaya, O.V. Murashko, M.Yu. Zhandarov, A.R. Rombalskaya**  
 Analysis of cases of smooth muscle tumors of the uterus with uncertain malignant potential (STUMP) at the SI «Republican research center for radiation medicine and human ecology»

<b>С.Л. Зыблев, А.Е. Силин, В.Н. Мартинков, С.В. Зыблева, А.В. Величко, Б.О. Кабешев</b>		<b>S.L. Zyblev, A.E. Silin, V.N. Martinkov, S.V. Zybleva, A.V. Velichko, B.O. Kabeshev</b>	
Динамика уровня такролимуса у реципиентов почечного трансплантата	100	Dynamics of tacrolimus levels in renal transplant recipients	
<b>С.А. Иванов, О.Г. Хоров, А.М. Юрковский, А.С. Богомаз</b>		<b>S.A. Ivanov, O.G. Khorov, A.M. Yurkovsky, A.S. Bogomaz</b>	
Замещение дефектов наружного носа с использованием хрящевых аллогraftов: послеоперационные осложнения и косметические результаты	105	Nasal defect reconstruction using cartilage allografts: postoperative complications and cosmetic outcomes	
<b>Т.Х. Нгуен, Д.Ш. Нгуен, В.Д. Чан, Ф.К. Дао, Т.Б.Л. Нгуен, М.Т. Нгуен</b>		<b>T.H. Nguen, D.Sh. Nguen, V.D. Chan, F.K. Dao, T.B.L. Nguen, M.T. Nguen</b>	
Распространенность респираторных симптомов у рабочих промышленных предприятий	111	Prevalence of respiratory symptoms in industrial workers	
<b>И.А. Новикова, К.С. Макеева, Е.Ф. Мицура</b>		<b>I.A. Novikova, K.S. Makeyeva, E.F. Mitsura</b>	
Параметры функциональной активности нейтрофилов у детей с наследственным сфероцитозом	121	Parameters of neutrophil functional activity in children with hereditary spherocytosis	
<b>Э.А. Повелица, О.В. Пархоменко, В.А. Рожко, В.А. Доманцевич, А.В. Доманцевич, А.А. Чулков, А.М. Шестерня, О.Г. Жариков</b>		<b>E.A. Povelitsa, O.V. Parhomenko, V.A. Rohko, V.A. Domantsevich, A.V. Domantsevich, A.A. Chulkov, A.M. Shesternya, O.G. Zharikov</b>	
Хирургическое лечение андрогенитальных проявлений варикозной болезни малого таза	127	Surgical treatment of androgenital manifestations of pelvic vein disease	
<b>Э.А. Повелица, О.В. Пархоменко, В.А. Рожко, В.А. Доманцевич, А.М. Шестерня</b>		<b>E.A. Povelitsa, O.V. Parhomenko, V.A. Rozhko, V.A. Domantsevich, A.M. Shesternya</b>	
Микрохирургическая флэбэктомия вен семенного канатика с использованием системы визуализации 3d NGENUITY	136	Microsurgical phlebectomy of the spermatic cord veins using the 3d NGENUITY visualization system	
<b>Е.В. Родина, Д.И. Гавриленко, Н.И. Корженевская, О.А. Романива, А.П. Саливончик, Н.Г. Кадочкина, С.Н. Коржева, Е.В. Семеняго, Е.П. Науменко</b>		<b>A.V. Rodzina, D.I. Haurlyenka, N.I. Karzhaneuskaya, A.A. Romaniva, A.P. Salivontchik, N.G. Kadotchkina, S.N. Korzhava, Ye.V. Semeniah, A.P. Naumenka</b>	
Структурно-функциональные изменения сердца у пациентов, перенесших ИНФЕКЦИЮ COVID-19	142	Structural and functional cardiac changes in patients with COVID-19 infection	
<b>А.А. Чулков, З.А. Дундаров, А.В. Величко, Б.О. Кабешев, Э.А. Повелица, Я.Л. Навменова, Ю.И. Ярец</b>		<b>A.A. Chulkov, Z.A. Dundarov, A.V. Velichko, B.O. Kabeshev, E.A. Povelitsa, Ya.L. Navmenova, Yu.I. Yarets</b>	
Клинико-лабораторная оценка функции гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой оси у пациентов после унилатеральной адреналэктомии	148	Clinical and laboratory evaluation of the hypothalamic-pituitary-adrenal axis function in patients after unilateral adrenalectomy	

**Обмен опытом****Experience exchange****А.В. Жарикова, Н.В. Лысенкова**

Мультидисциплинарный подход — залог успешности лечения пациентов с хронической мигренью

154

**А.С. Подгорная, А.Ю. Захарко, О.В. Мурашко, В.Н. Калачев**

ACUM — редкая мюллеровая патология (клинический случай)

161

**Н.В. Холупко, Я.Л. Навменова, Е.С. Махлина, А.В. Коротаев, А.В. Рожко**

Амиодарон-индуцированный тиреотоксикоз: клинический случай

167

**A.V. Zharikova, N.V. Lysenkova**

Multidisciplinary approach is the key to successful treatment of patients with chronic migraine

**A.S. Podgornaya, A.Yu. Zakharko, O.V. Murashko, V.N. Kalachev**

ACUM — rare mullerian pathology (clinical case)

**N.V. Kholupko, Ya.L. Navmenova, E.S. Makhlina, A.V. Korotaev, A.V. Rozhko**

Amiodarone-induced thyrotoxicosis: a clinical case

## АНТИОКСИДАНТНАЯ СИСТЕМА ПЕЧЕНИ КРЫС-САМЦОВ НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ ОНТОГЕНЕЗА В УСЛОВИЯХ ХРОНИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

*ГНУ «Институт радиобиологии НАН Беларуси», г. Гомель, Беларусь*

Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) признано, что электромагнитные поля радиочастотного диапазона (ЭМП РЧ) являются одним из наиболее распространенных источников электромагнитного излучения и значимым фактором для здоровья человека, оказывая выраженное биологическое действие. Кроме того, окислительный стресс, вызванный гиперпродукцией свободных радикалов вследствие воздействия ЭМП РЧ, является фактором, провоцирующим развитие многих заболеваний, в частности — патологий печени, в том числе и у лиц пожилого возраста.

Впервые проведены исследования состояния антиоксидантной системы печени крыс-самцов на различных этапах постнатального развития (молодой, взрослый, при старении и предстарческий периоды) в условиях хронического воздействия ЭМП Wi-Fi-устройства (2,45 ГГц, ППЭ- $0,79 \pm 0,52$  мкВт/см<sup>2</sup>, 24 ч/сутки, ежедневно) начиная с 50-дневного возраста и до достижения ими 24 месяцев.

В цитозольно-микросомальной фракции методом спектрофотометрии определяли активность супероксиддисмутазы, каталазы, глутатионпероксидазы, глутатионредуктазы и глутатион-S-трансферазы, а в гомогенате ткани определяли концентрацию белково-связанного глутатиона, сульфгидрильных групп белков, общих SH-групп, восстановленного глутатиона и продуктов окисления белков.

Выявленные изменения состояния антиоксидантной системы печени при хроническом воздействии ЭМП Wi-Fi-оборудования на организм в процессе старения свидетельствуют об активации глутатионзависимой системы у экспериментальных животных. Эти изменения проявляются в поддержании стабильно повышенного уровня восстановленной формы тиолов в ткани печени и являются адаптивной реакцией клеток на длительное пребывание организма под воздействием ЭМП от Wi-Fi-оборудования.

**Ключевые слова:** электромагнитное поле, Wi-Fi, крысы-самцы, печень, антиоксидантная система

### **Введение**

С развитием передовых телекоммуникационных технологий и ростом числа пользователей беспроводной связи увеличивается электромагнитная (ЭМ) нагрузка на окружающую среду. Основной вклад в увеличение уровней ЭМ фона вносят радиотехнические объекты, к которым относятся и устройства беспроводной передачи данных — Wireless Fidelity (Wi-Fi). Несмотря на низкую интенсивность данного вида электромагнитного излучения (ЭМИ),

воздействие которого носит нетепловой характер [1], оно обладает высокой биологической активностью. Поэтому важно исследовать, понимать и отслеживать любые неблагоприятные последствия ЭМИ для человека, что является крайне необходимыми радиобиологическими критериями для определения предельно допустимых уровней и оценки опасности беспроводной сотовой связи для населения [2]. В настоящее время Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ, WHO — World Health

Organization) признано, что электромагнитные поля диапазона радиочастот (ЭМП РЧ) являются одними из наиболее распространенных источников электромагнитного излучения искусственного происхождения и значимым фактором для здоровья человека, оказывая на него выраженное биологическое действие [3].

Известно, что в основе многих заболеваний человека и животных лежат процессы изменения структурно-функциональных свойств белков, нуклеиновых кислот, биомембран и свободно-радикальные процессы окисления [4]. Протекание свободно-радикальных процессов вызывает особый интерес в связи с участием свободных радикалов в образовании утрачивающих свою биологическую роль модифицированных биомолекул, повреждении клеток и, как следствие, развитию различного рода нарушений. Интересным представляется изучение метаболической активности печени — органа, являющегося местом синтеза и обмена большого числа соединений, детоксификации продуктов метаболизма, а также синтеза жирных кислот, жиров, кетоновых тел, холестерина. Любая патология печени сопровождается оксидативным стрессом, который является основным фактором нарушения ее функций и структуры [5]. В исследованиях последних двух десятилетий накоплена огромная доказательная база о связи гиперпродукции активных форм кислорода (АФК) и воздействием электромагнитного поля (ЭМП) устройств беспроводной связи (мобильный телефон, устройства Wi-Fi) [6], что, по нашему мнению, может негативно сказаться на антиоксидантной системе печени. В связи с чем печень является уникальным органом для объективной оценки механизмов биологической реализации в формировании патологических процессов в организме при воздействии низкоинтенсивного ЭМП РЧ. Учитывая тот факт, что воздействие ЭМП от источников беспроводной связи влияет на компенсаторные процессы, а также приводит к накоплению неблагоприятных биологических эффектов [7], представляется

актуальным анализ состояния антиоксидантной системы печени организма на различных этапах постнатального развития в условиях хронического воздействия ЭМП устройства Wi-Fi.

В связи с вышеизложенным, целью настоящей работы явилось изучение состояния антиоксидантной системы печени крыс-самцов различных возрастных групп, подвергнутых хроническому воздействию электромагнитного поля оборудования Wi-Fi (2,45 ГГц).

### **Материал и методы исследования**

Исследования выполнены на 96 белых крысах-самцах линии Вистар возрастом 50–52 сут и массой  $160,1 \pm 1,4$  г. на начало эксперимента. Все животные были разделены на две группы: 1. Контроль (n=48) — животные, не подвергавшиеся воздействию ЭМП; 2. Животные (n=48), подвергавшиеся воздействию ЭМП устройства Wi-Fi с возраста 50 дней и до достижения ими 24-х месяцев. Выведение из зоны облучения и анализ состояния антиоксидантной системы печени проводили при достижении животными возраста 3-х, 6-, 9-, 12-, 18-ти и 24-х месяцев. Выбранные исследуемые возрастные периоды соответствуют таким возрастным категориям, как: молодой, взрослый, при старении и предстарческий организм.

Исследования проводились на базе vivария Государственного научного учреждения «Институт радиобиологии Национальной академии наук Беларуси» после одобрения Этическим комитетом данной организации (протокол заседания №3 от 24.02.2021 г.). Животные как контрольной, так и экспериментальных групп содержались в соответствии с принципами Нидежащей лабораторной практики (OECD Guide 1:1998, IDT, ГОСТ 33044-2014) в условиях оптимальной внешней температуры (21–23°C), циклов света/темноты (12/12 часов), бесперебойного электропитания, защиты от инфекций, окружающего шума и других факторов окружающей среды. Манипуляции на животных проводились

с соблюдением положений «Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментальных и других научных целей» (Directive 2010/63/EU).

Источником ЭМП являлся маршрутизатор Netis WF2780 (Netis SYSTEMS, China). Облучение проводилось на частоте 2,45 ГГц 24 час/день 7 дней в неделю. Роутер размещался в центральной части рабочей зоны (1,2×0,8 м), в которой находились 4 пластиковые клетки с животными. Расстояние от источника излучения (роутера) до клетки составляло 20 см. Во время облучения осуществлялся дистанционный контроль наличия электромагнитного поля. Плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ) измерялась прибором ПЗ-41 (СКБ Питон, РФ) в 8 точках на расстоянии 20 см от источника облучения и составляла в среднем  $0,79 \pm 0,52$  мкВт/см<sup>2</sup>.

По окончании ЭМ воздействия животных контрольной (n=8) и экспериментальной (n=8) групп соответствующего возраста наркотизировали (эфирный наркоз), подвергали декапитации с последующей лапаротомией и экстирпацией печени, навески которой немедленно помещали в жидкий азот. Фракционирование ткани печени проводилось согласно Natarajan S.K. и др. (2006) [8]. Выделенный материал гомогенизировали на льду в 9-кратном объеме раствора фосфатно-солевого буфера (PBS, pH 7,4, Invitrogen) и центрифугировали с помощью рефрижераторной центрифуги Centurion K-220R при 600g в течение 5 минут и 4°C. Для получения цитозольно-микросомальной фракции полученный супернатант центрифугировали при 20000g в течение 20 минут и 4°C.

В цитозольно-микросомальной фракции ткани печени спектрофотометрическим методом определяли активности супероксиддисмутазы (SOD), каталазы (Cat), глутатионпероксидазы (GPx), глутатионредуктазы (GR), глутатион-S-трансферазы (G-S-T), а в гомогенате ткани — концентрации глутатиона связанного с белком (G-SS-Pr), протеиновых сульфгидрильных

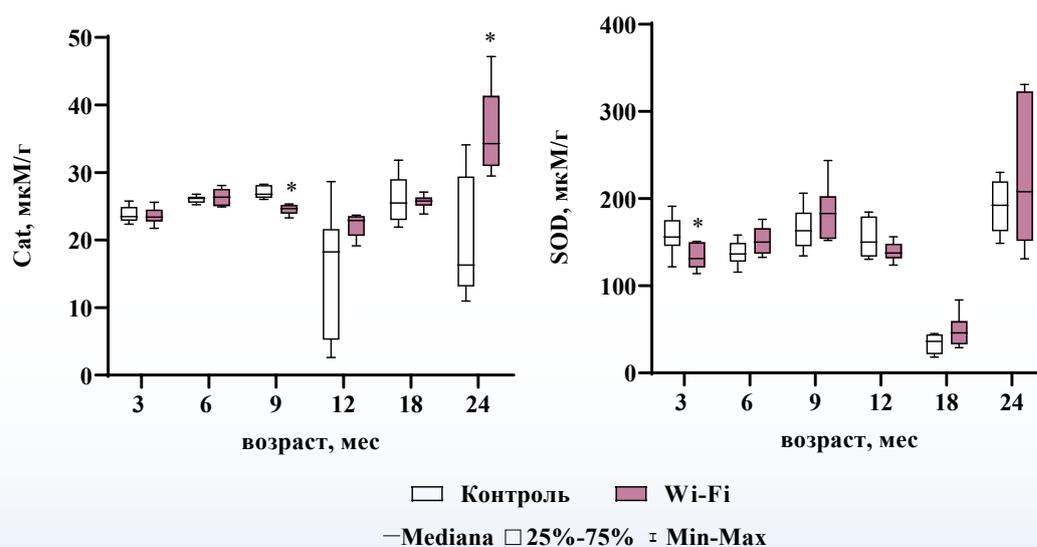
групп (Pr-SH), общих SH групп (T-SH) и восстановленного глутатиона (G-SH) [9-14]. Для расчета активности и содержания изучаемых показателей в гомогенате и цитозольно-микросомальной фракции ткани печени был определен общий белок по методу Лоури в модификации Петерсона [15]. Измерения интенсивности флуоресценции выполнялись на микропланшетном ридере Tecan Infinite M200 (Tecan Ltd., Швейцария) с использованием 96-луночных планшетов (Greiner Bio-One). Оптическую плотность в исследуемых образцах измеряли на микропланшетном ридере в Tecan Safire2 с использованием 96-луночных микропланшетов (Sarstedt). Измерение и анализ полученных данных проводили при помощи специализированного программного обеспечения Tecan Magellan (v.6.6).

Полученные данные обрабатывали общепринятыми методами биологической статистики, используя пакеты программ Excel и GraphPadPrism 8.3. Значимость наблюдаемых отличий двух независимых групп по количественному признаку оценивали с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни (Mann-Whitney, U-test). Данные представлены в виде медианы (Me) и 25 и 75 перцентилей (25%–75%). Различия считали статистически значимыми при вероятности ошибки менее 5% ( $p < 0,05$ ).

### Результаты исследования

Антиоксидантная система (АОС), наряду с иммунной, относится к контролирующей системе гомеостаза, работа которой осуществляется постоянно. Анализ показателей, характеризующих состояние антиоксидантной системы печени крыс-самцов, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП Wi-Fi, показал различную возрастную чувствительность изучаемой системы на воздействующий фактор.

Проведено исследование динамики изменения активности Cat и SOD, как одних из ключевых ферментов антиоксидантной системы (участвующих в элиминации перекиси водорода и вторичных радикалов,



**Рисунок** — Активность каталазы (Cat) и супероксиддисмутазы (SOD) в цитозольно-микросомальной фракции ткани печени крыс-самцов в возрасте 3, 6, 9, 12, 18 и 24 месяцев, подвергнутых хроническому воздействию ЭМП устройства Wi-Fi

которые образуются во время окислительного стресса). Установлено, что хроническое воздействие ЭМП Wi-Fi на организм крыс-самцов в период раннего постнатального развития (3 месяца) приводит к статистически значимому снижению активности SOD — на 15,8% ( $p=0,05$ ), тогда как у 6- и 9-ти месячных животных выявлено повышение активности данного фермента на 10,0 и 12,01% соответственно, но данное изменение не носило статистически значимого характера (рисунок).

Анализ ферментативной активности каталазы не показал значительных отклонений от контрольного уровня у молодых животных (в возрасте 3 и 6 месяцев), за исключением незначительного — на 7,3% ( $p=0,03$ ) — падения его активности у более взрослой категории животных (9 месяцев). Выявленное повышение активности каталазы более чем в 2 раза ( $p=0,03$ ) у животных предстарческого возраста (24 месяца) может указывать на активацию защитных функций организма адаптационного характера на чрезмерное образование активных форм кислорода и интенсификацию окислительного стресса (Таблица).

Центральную роль в антиоксидантной защите организма играет глутатионовая система, которая включает сам глутатион (G-SH) и глутатион связанного с белком (G-SS-Pr), а также глутатион-зависимые ферменты: глутатионпероксидазу (GPx), глутатионредуктазу (GR) и глутатион-S-трансферазу (G-S-T).

Изучаемый нами тиол/дисульфидный баланс играет важную роль в поддержании нормального антиоксидантного статуса организма. При увеличении генерации свободных радикалов происходит активация глутатионового звена антиоксидантной системы и смещение баланса в сторону образования небелковых тиолов посредством ускорения их синтеза из аминокислот, либо путем усиления конверсии окисленного глутатиона (G-SS-Pr) в восстановленный (G-SH) при помощи GR. Рассматривая реакцию глутатионзависимой антиоксидантной системы печени отмечено значительное повышение концентрации G-SH у облученных животных в возрасте 3 месяца — более чем в 3 раза ( $p=0,02$ ). Тогда как у взрослых животных и при старении увеличение концентрации восстановленного глутатиона на 48,4%

**Таблица — Активность глутатионовой антиоксидантной системы цитозольно-микросомальной фракции печени крыс-самцов в возрасте 3-х, 6-, 9-, 12-, 18-ти и 24-х мес, подвергнутых хроническому воздействию низкоинтенсивного ЭМП**

	Показатели						
	GPx, Ед/мг белка	G-SH, мМ/г ткани	GR, Ед/мг белка	G-S-T, Ед/мг белка	G-SS-Pr, мМ/г ткани	Pr-SH, мМ/г ткани	T-SH, мМ/г ткани
3 месяца							
Контроль	0,34 (0,30; 0,43)	0,68 (0,54; 1,39)	3,43 (3,12; 3,85)	2,67 (2,40; 3,68)	0,82 (0,76; 0,92)	25,60 (24,03; 26,33)	26,38 (24,37; 28,67)
Wi-Fi	0,31 (0,29; 0,34)	2,08 (1,36; 2,36)*	4,01 (3,36; 5,47)	1,33 (0,96; 1,55)*	0,70 (0,64; 0,82)*	23,94 (22,63; 25,78)	25,69 (23,87; 28,11)
6 месяцев							
Контроль	0,31 (0,26; 0,44)	0,18 (0,17; 0,19)	3,52 (2,92; 4,25)	3,63 (2,81; 4,30)	0,85 (0,79; 0,88)	25,08 (23,46; 27,14)	25,26 (23,51; 27,32)
Wi-Fi	0,28 (0,12; 0,33)	0,30 (0,15; 0,85)	3,26 (2,73; 3,59)	3,17 (2,67; 3,69)	0,88 (0,72; 0,93)	25,11 (23,63; 26,78)	25,84 (24,26; 26,95)
9 месяцев							
Контроль	0,35 (0,25; 0,37)	0,28 (0,14; 0,38)	3,66 (2,90; 4,42)	2,33 (2,13; 3,06)	0,84 (0,76; 0,91)	23,02 (21,83; 25,98)	23,27 (22,28; 26,22)
Wi-Fi	0,29 (0,22; 0,36)	0,19 (0,16; 0,21)	3,48 (2,84; 4,26)	2,52 (1,80; 2,80)	0,81 (0,75; 0,90)	23,47 (22,35; 24,92)	23,65 (22,89; 25,10)
12 месяцев							
Контроль	0,18 (0,08; 0,20)	1,86 (1,38; 2,44)	4,26 (3,83; 5,90)	8,55 (8,28; 9,17)	1,00 (0,92; 1,16)	29,87 (27,81; 32,61)	31,28 (29,24; 35,10)
Wi-Fi	0,05 (0,02; 0,13)*	2,76 (2,44; 3,20)*	4,87 (2,59; 5,56)	8,04 (7,71; 8,85)	1,00 (0,87; 1,06)	29,22 (27,89; 30,18)	31,95 (30,62; 33,31)
18 месяцев							
Контроль	0,71 (0,68; 0,72)	0,34 (0,30; 0,49)	3,49 (1,85; 4,11)	16,88 (14,46; 19,01)	1,52 (1,31; 1,75)	30,73 (29,33; 31,84)	39,82 (37,42; 41,99)
Wi-Fi	0,81 (0,76; 0,86)	0,54 (0,47; 0,76)*	4,96 (3,06; 6,74)	17,14 (15,12; 18,99)	1,59 (1,54; 1,70)	28,38 (27,52; 30,42)	39,70 (38,66; 42,87)
24 месяца							
Контроль	0,79 (0,67; 1,09)	10,79 (7,56; 13,25)	9,45 (6,56; 11,20)	9,60 (8,22; 11,41)	1,47 (1,29; 1,77)	23,87 (22,64; 25,25)	35,63 (30,17; 38,96)
Wi-Fi	0,96 (0,72; 1,29)	13,68 (9,79; 14,65)	10,07 (8,40; 14,04)	9,91 (8,57; 12,50)	1,78 (1,57; 2,54)	22,90 (22,14; 23,64)	37,46 (34,13; 40,01)

Примечания: GPx — глутатионпероксидаза; G-SH — глутатион восстановленный; GR — глутатионредуктаза; G-S-T — глутатион-S-трансфераза; G-SS-Pr — глутатион связанный с белком; Pr-SH — прогеиновые сульфгидрильные группы; T-SH — общие SH группы; \* — статистически значимые различия к группе Контроль при уровне значимости ≤0,05 (Mann-Whitney test).

( $p=0,02$ ) и 58,8% ( $p=0,03$ ) сопряжено со снижением активности GPx у 12-месячных животных (на 72,3% ( $p=0,04$ )) и близким к статистически значимому повышением его активности у животных при старении (на 14,1 % ( $p=0,06$ )).

Установлено, что хроническое воздействие ЭМП Wi-Fi приводит к снижению активности G-S-T у 3-месячных животных на 50,2% ( $p=0,003$ ), что может сказаться в развитии деструктивных процессов в организме за счет накопления конечных продуктов перекисного окисления липидов вследствие уменьшения конъюгации их с GSH. У животных других возрастных категорий не установлено изменений ферментативной активности G-S-T от контрольного значения.

Известно, что базовым механизмом тиол-опосредованного окислительно-восстановительного (редокс) контроля в клеточном метаболизме является способность тиольных групп обратимо изменять свое редокс-состояние с последующим изменением конформационных, каталитических или регуляторных функций белка [4]. В нашем исследовании установлено вероятное смещение редокс-баланса в сторону восстановленной формы тиолов, произошедшее, однако, не за счет ферментативной конверсии (на что указывает отсутствие увеличения активности GP), а при помощи интенсификации синтеза из аминокислот предшественников. Кроме того, значительные количества глутатиона могут накапливаться из-за снижения его конъюгирования под действием G-S-T с различными субстратами [4-5].

Система глутатиона работает в связи с ферментативным звеном антиоксидантной системы, обеспечивающим быструю деактивацию активных форм кислорода органических и неорганических пероксидов в неопасные конечные продукты. В нашем исследовании не выявлено повышения активности ферментативного звена АОС, что может быть обусловлено достаточно высоким уровнем GSH в ткани печени, играющего роль ловушки для свободных радика-

лов, — вступает с ними в реакцию и окисляется с образованием GSSG. При этом отсутствие увеличения активности GR может указывать на преимущественный рост содержания GSH при помощи увеличения его синтеза, а не посредством конверсии из GSSG. Сниженная активность GPx, вероятно, обусловлена либо недостатком селена, входящего в активный центр фермента, либо снижением ее синтеза в результате подавления экспрессии генов [16].

В свою очередь в состоянии АОС ткани печени организма при его старении в условиях хронического воздействия ЭМП устройства Wi-Fi сохраняется напряжение, обусловленное образованием свободных радикалов, что подтверждается повышенным уровнем GSH. Повышение активности GPx может указывать на образование гидропероксидов липидов, в деактивации которых она принимает непосредственное участие.

К тому же, считается, что одним из маркеров формирования адаптивного ответа при хроническом воздействии низкоинтенсивного излучения (в отличие от кратковременного) является изменение процессов на транскрипционном уровне путем усиления транскрипции участков, содержащих антиоксидантные гены, в том числе  $\gamma$ -глутамилцистеинсинтетазы ( $\gamma$ GCS) — лимитирующей синтез GSH, и на эпигенетическом уровне путем повышения уровня метилирования ДНК на промоторе  $\gamma$ GCS. Эти изменения в дальнейшем приводят к стабильно повышенному содержанию GSH, что может являться одним из механизмов радиоадаптации клетки к длительному воздействию ЭМП от оборудования Wi-Fi [16].

### **Заключение**

Таким образом, выявленные изменения в состоянии антиоксидантной системы печени при хроническом воздействии ЭМП от оборудования Wi-Fi на организм при старении указывают на активацию глутатионзависимой системы у экспериментальных животных. Выявленные изменения проявляются в поддержании стабиль-

но повышенного уровня восстановленной формы тиолов в ткани печени и являются адаптивным ответом клеток на длительное нахождение организма в условиях воздействия ЭМП от оборудования Wi-Fi.

### Библиографический список

1. Adair, E.R. Thermoregulatory responses to RF energy absorption / E.R. Adair, D.R. Black // *Bioelectromagnetics*. – 2003. – Vol. 24, №S6. – P. S17-S38.
2. Григорьев, Ю.Г. Сотовая связь и здоровье: электромагнитная обстановка, радиобиологические и гигиенические проблемы, прогноз опасности / Ю.Г. Григорьев, О.А. Григорьев. – М.: Экономика, 2016. – 574 с.
3. International Agency Research on Cancer (IARC) classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans // WHO. Press Release. Lyon, France. – 2011. – № 208. – P. 1-6.
4. Gutteridge, J.M.C. Free radicals in biology and medicine / J.M.C. Gutteridge, B. Halliwell. – Ed. 5th. – Oxford. : Oxford University Press, 2015. – 905 p.
5. Oxidative stress and antioxidants in hepatic pathogenesis / H.L. Ha [et al.] // *World J Gastroenterol*. – 2010. – Vol. 16(48). – P. 6035-6043.
6. Effects of radiofrequency electromagnetic radiation emitted from a mobile phone base station on the redox homeostasis in different organs of Swiss albino mice / M. Zosangzuali [et al.] // *Electromagnetic Biology and Medicine*. – 2021. – Vol. 40, №3. – P. 393-407.
7. Grigoriev, Y. Methodology of Standards Development for EMF RF in Russia and by International Commissions: Distinctions in Approaches / Y. Grigoriev // *Dosimetry in Bioelectromagnetics*. Edited by Marko Markov. Boca Raton: CRC Press, Taylor & Frankis Group, 2017. – P. 315-337.
8. Oxidative stress in the development of liver cirrhosis: a comparison of two different experimental models / S.K. Natarajan [et al.] // *Journal of gastroenterology and hepatology*. – 2006. – Vol. 21, №6. – P. 947-957.
9. Сирота, Т.В. Использование нитросинего тетразолия в реакции автоокисления адреналина для определения активности супероксиддисмутазы / Т.В. Сирота // *Биомедицинская химия*. – 2013. – Т. 59, №4. – С. 399-410.
10. Метод определения активности каталазы / М.А. Королук [и др.] // *Лабораторное дело*. – 1988. – №. 4. – С. 44-47.
11. Моин, В.М. Простой и специфический метод определения активности глутатионпероксидазы в эритроцитах / В.М. Моин // *Лаб. дело*. – 1986 г. – № 12. – С. 724-727.
12. Юсупова, Л.Б. О повышении точности определения активности глутатионредуктазы эритроцитов / Л.Б. Юсупова // *Лаб. дело*. – 1989. – № 4. – С. 19-21.
13. Sedlak, J. Estimation of total, protein-bound, and nonprotein sulfhydryl groups in tissue with Ellman's reagent / J. Sedlak, R.H. Lindsay // *Analytical biochemistry*. – 1968. – Vol. 25. – P. 192-205.
14. Advanced oxidation protein products as a novel marker of oxidative stress in uremia / V. Witko-Sarsat [et al.] // *Kidney international*. – 1996. – Vol. 49, №5. – P. 1304-1313.
15. Peterson, G.L. A simplification of the protein assay method of Lowry et al. which is more generally applicable / G.L. Peterson // *Analytical biochemistry*. – 1977. – Vol. 83, №2. – P. 346-356.
16. Калинина, Е.В. Роль глутатиона, глутатионтрансферазы и глутаредоксина в регуляции редокс-зависимых процессов / Е.В. Калинина, Н.Н. Чернов, М.Д. Новичкова // *Успехи биологической химии*. – 2014. – Т. 54. – С. 299-348.

**N.V. Chueshova, V.M. Schemelev, E.A. Shchurova, I.A. Cheshik**

## **ANTIOXIDANT SYSTEM OF THE LIVER OF MALE RATS AT DIFFERENT STAGES OF ONTOGENESIS UNDER CONDITIONS OF CHRONIC EXPOSURE TO LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC FIELD**

Currently, the World Health Organization (WHO) recognizes that radio frequency electromagnetic fields (RF EMF) are one of the most common sources of electromagnetic radiation and are significant factors for human health, having a pronounced biological effect. In addition, oxidative stress caused by hyperproduction of free radicals due to exposure to RF EMF is a factor that provokes the development of many diseases and, in particular, liver pathologies, including in the elderly.

For the first time, studies were conducted on the state of the antioxidant system of the liver of male rats at various stages of postnatal development (young, adult, aging and pre-senile periods) under conditions of chronic exposure to EMF from a Wi-Fi device (2,45 GHz, PD=

0,79±0,52  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 24 h/day, daily) from the age of 50 days until they reach 24 months. In the cytosolic-microsomal fraction, the activity of superoxide dismutase, catalase, glutathione peroxidase, glutathione reductase and glutathione-S-transferase was determined by spectrophotometry, and in the tissue homogenate, the concentration of protein-bound glutathione, sulfhydryl groups of proteins, total SH groups, reduced glutathione and protein oxidation products was determined.

The revealed changes in the state of the liver antioxidant system during chronic exposure to EMF from Wi-Fi equipment on the body during aging indicate activation of the glutathione-dependent system in experimental animals. The revealed changes are manifested in maintaining a stably elevated level of the reduced form of thiols in the liver tissue and are an adaptive response of cells to prolonged exposure of the body to EMF from Wi-Fi equipment.

**Key words:** *electromagnetic field, Wi-Fi, male rats, liver, antioxidant system*

*Поступила 23.09.2024*