

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА СТРЕССИНДУЦИРОВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ У КРЫС

М.Ю. Раваева^{1,*}, И.В. Черетаев¹, Е.Н. Чуян¹, М.В. Нагорская¹,
П.А. Галенко-Ярошевский²

¹ ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»
295007, Российская Федерация, Республика Крым, Симферополь, пр-кт Академика Вернадского, 4

² ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздрава России
350063, Российская Федерация, Краснодарский край, Краснодар, ул. им. Митрофана Седина, 4

В работе исследовали влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) на стрессиндуцированные изменения гематологических показателей у крыс. Показано, что изолированное действие стресс-факторов различной интенсивности существенно изменяет некоторые гематологические показатели самцов крыс, а их комбинированное применение с ЭМИ КВЧ модифицирует эффекты изолированного воздействия этих стресс-факторов. Так, в условиях гипокинетического стресса (ГК) относительно контроля увеличивалось количество эритроцитов (на 12,7%; $p<0,05$), при оксидативном стрессе (ОКС) снижался гематокрит (на 19,0%; $p<0,001$), а при остром стрессе возрастала средняя концентрация гемоглобина в эритроците (на 22,6%; $p<0,05$). Комбинированное воздействие стресс-факторов различной природы с ЭМИ КВЧ существенно изменяло эффекты, характерные для изолированного воздействия этих стресс-факторов. Так, гипокинетический стресс в сочетании с низкоинтенсивным электромагнитным излучением крайне высокой частоты (ГК-КВЧ) по сравнению с ГК снижали количество эритроцитов на 11,0% ($p<0,05$) и уровень гемоглобина на 11,2% ($p<0,001$), возвращая эти показатели к уровню контроля. Комбинированное воздействие ОКС-КВЧ нивелировало эффект снижения гематокрита при ОКС, но снижало средний объем эритроцита и повышало среднюю концентрацию гемоглобина в эритроците на 24,3% ($p<0,001$) по сравнению с контролем. Уменьшалось количество лейкоцитов и лимфоцитов при ОКС и ОКС-КВЧ, при этом комбинация ОКС с ЭМИ КВЧ ослабляла стрессорный повреждающий эффект ОКС.

Ключевые слова: острый стресс, хронический гипокинетический стресс, оксидативный стресс, гематологические показатели, низкоинтенсивное электромагнитное излучение крайне высокой частоты

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-24-00332 «Тканевая микрогемодинамика: механизмы антистрессорного действия низкоинтенсивного миллиметрового излучения».

Для цитирования: Раваева М.Ю., Черетаев И.В., Чуян Е.Н., Нагорская М.В., Галенко-Ярошевский П.А. Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты на стрессиндуцированные изменения гематологических показателей у крыс. *Биомедицина*. 2024;20(4):37–47. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-20-4-37-47>

Поступила 08.10.2024

Принята после доработки 11.11.2024

Опубликована 10.12.2024

EFFECT OF LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC RADIATION OF ULTRAHIGH FREQUENCY ON STRESS-INDUCED CHANGES IN HEMATOLOGICAL PARAMETERS OF RATS

Marina Y. Ravaeva^{1,*}, Igor V. Cheretaev¹, Elena N. Chuyan¹, Mariya V. Nagorskaya¹, Pavel A. Galenko-Yaroshevskii²

¹ V.I. Vernadsky Crimean Federal University
295007, Russian Federation, Republic of Crimea, Simferopol, Academician Vernadsky Ave., 4

² Kuban State Medical University of the Ministry of Health Care of Russia
350063, Russian Federation, Krasnodar Region, Krasnodar, Imeni Mitrofana Sedina Str., 4

This work investigated the effect of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency (EMR EHF) on stress-induced changes in hematological parameters in rats. The isolated action of stress factors of varying intensity was shown to significantly change a number of hematological parameters of male rats, while their combined action with EMR EHF modifies the effects of isolated stress factors. Thus, under the conditions of hypokinetic stress (HS) relative to the control, the number of erythrocytes increased by 12.7% ($p<0.05$); under oxidative stress (OS), hematocrit values decreased by 19.0% ($p<0.001$); and under acute stress, the mean concentration of hemoglobin in erythrocytes increased by 22.6% ($p<0.05$). The effect of stress factors of various origins in combination with EMR EHF significantly changed the effects characteristic of isolated action of these stress factors. Thus, hypokinetic stress in combination with low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency (HS-EHF) compared to HS reduced the number of erythrocytes by 11.0% ($p<0.05$) and the hemoglobin level by 11.2% ($p<0.001$), restoring these indices to the control level. The combined effect of OS-EHF neutralized the effect of hematocrit reduction in OS, although reducing the mean corpuscular volume and increased the mean corpuscular hemoglobin concentration by 24.3% ($p<0.001$) compared to the control. The number of leukocytes and lymphocytes decreased in OS and OS-EHF, while the combination of OS with EMR EHF weakened the stress-related damaging effect of OS.

Keywords: acute stress, chronic hypokinetic stress, oxidative stress, rats, hematological parameters, low-intensity electromagnetic radiation at extremely high frequency

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

Funding: the work was carried out within the framework of the RSF project No. 23-24-00332 “Tissue microhemodynamics: mechanisms of the anti-stress action of low-intensity millimeter radiation”.

For citation: Ravaeva M.Y., Cheretaev I.V., Chuyan E.N., Nagorskaya M.V., Galenko-Yaroshevskii P.A. Effect of Low-Intensity Electromagnetic Radiation of Ultrahigh Frequency on Stress-Induced Changes in Hematological Parameters of Rats. *Journal Biomed.* 2024;20(4):37–47. <https://doi.org/10.33647/2074-5982-20-4-37-47>

Submitted 08.10.2024

Revised 11.11.2024

Published 10.12.2024

Введение

В настоящее время в литературе накоплены различные сведения о положительном влиянии низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) на количество форменных элементов крови и связанные с ними показатели. Так, в работе [4] было установлено, что при-

менение низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ с частотой 42,19 Гц и длиной волны 7,1 мм — как с плотностью потока мощности 10 мВт/см², так и 0,002 мкВт/см² — ослабляет токсическое действие цитостатиков на гранулоцитарный и эритроидный ряды, т. к. наблюдалась меньшая степень снижения содержания лейкоцитов, гемо-

глубина, эритроцитов в периферической крови, общего числа миелокариоцитов и эритрокариоцитов в костном мозге животных, получавших КВЧ-воздействие, на 4-й день после введения противоопухолевых препаратов. Под влиянием миллиметровых волн стимулировались процессы регенерации красного ростка, для которого был характерен более длительный период восстановления, чем для гранулоцитарного ряда. Авторы данной работы сделали вывод, что ЭМИ КВЧ в условиях токсического повреждения оказывает антистрессорное действие, повышая неспецифическую резистентность организма.

В исследовании [7] показано, что применение 10-кратных сеансов КВЧ-терапии в комплексном лечении пациентов с хроническим генерализованным пародонтизом приводит к быстрому восстановлению показателей количественного состава популяций лимфоцитов в периферической крови. В данной работе в данной работе применяли аппарат «Явь-1» со следующими параметрами ЭМИ КВЧ: рабочая длина волны — 5,6 мм; девиация частоты — ± 150 МГц; выходная мощность — 22–25 мВт; плотность мощности на выходе рупора — 10 мВт/см². Каждый сеанс КВЧ-терапии проводился в течение 30 мин.

В экспериментах, описанных в работе [2], было продемонстрировано, что облучение низкой интенсивности способно уменьшать уровень агрегации тромбоцитов. В данной работе в качестве источника микроволнового излучения использовали генератор на основе диода Ганна с частотой в диапазоне от 32,9 до 39,6 ГГц (длина волны, соответственно, — от 9,1 до 7,6 мм) и мощностью излучения от 3 до 30 мВт. Излучение подводилось к исследуемому объекту с помощью волновода сечением 7,2×3,4 мм² с согласующими элементами. Эффект облучения проявлялся в снижении степени агрегации тромбоцитов по сравнению с контролем при добавлении индук-

тора агрегации — ристомидина, а также в уменьшении скорости агрегации тромбоцитов. Добавление этанола в среду тромбоцитов способствовало дальнейшему снижению контролируемых параметров. Авторы данного исследования связали механизм обнаруженного эффекта с усилением апоптоза клеток и предположили, что микроволновое облучение стимулирует увеличение скорости образования свободных радикалов в обогащённой тромбоцитами плазме и может регулировать агрегационную активность тромбоцитов.

Вместе с тем в изученной нами литературе практически отсутствуют сведения о действии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на гематологические показатели в условиях его комбинации со стрессорными воздействиями, а в отношении эритроцитарных гематологических показателей и индексов не удалось обнаружить данных об эффектах низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ.

Цель исследования — проанализировать эффекты воздействия низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на стрессиндуцированные изменения гематологических показателей у крыс и сравнить с изолированным воздействием стресс-факторов различной природы и продолжительности.

Материалы и методы

Экспериментальная часть работы выполнена на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» кафедры физиологии человека и животных и биофизики Института биохимических технологий, экологии, фармации, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского».

Исследование проведено в соответствии с ГОСТ Р-53434-2009 «Принципы надлежащей лабораторной практики» и правилами Европейской конвенции по защите позвоночных животных, используемых для экс-

периментальных и иных научных целей, правилами лабораторной практики при проведении доклинических исследований.

Экспериментальные животные

Эксперимент проводился на 160 половозрелых крысах-самцах популяции линий Wistar массой 220–250 г («ФГУП «Питомник лабораторных животных «Рапполово», Ленинградская обл.), прошедших карантин не менее 14 дней. Животные содержались в условиях вивария с естественным свето-темновым циклом при температуре 18–22°C на подстиле на основе початков кукурузы (ООО «Зилубаг», Россия), свободным доступом к воде и полноценному гранулированному корму ЛБК-120 (ЗАО «Тосненский комбикормовый завод», Россия). Исследование было выполнено в соответствии с «Правилами

проведения работ с использованием экспериментальных животных» и ГОСТ Р 53434-2009 от 02.12.2009 г., правилами лабораторной практики при проведении доклинических исследований и одобрено решением Этического комитета ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского».

Дизайн исследований

Для эксперимента были отобраны животные одинакового возраста, характеризующиеся средней двигательной активностью и низкой эмоциональностью в тесте «Открытое поле», которые составляют большинство в популяции. Такой отбор позволил сформировать однородные группы животных с одинаковыми конституционными особенностями, одинаково реагирующих на действие различных факторов.

Таблица 1. Последовательность воздействия стресс-факторов и ЭМИ КВЧ в различных группах
Table 1. Sequence of effects caused by stress factors and electromagnetic radiation of extremely high frequency in different groups

Группы	Сутки эксперимента									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
К	К	К	К	К	К	К	К	К	К	К
ОС										ОС
ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК	ГК
ОКСС	H ₂ O ₂									
КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ
ГК-КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ	ГК/КВЧ
ОС-КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ/ОС
ОКСС-КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	КВЧ	ОКСС/КВЧ

Примечание: К — контроль; ОС — группа крыс, подвергавшихся острому стрессу; ГК — группа крыс, подвергавшихся хроническому гипокинетическому стрессу; ОКСС — группа крыс, подвергавшихся действию оксидативного стресса; КВЧ — группа крыс, подвергавшаяся действию электромагнитного излучения крайне высокой частоты; ГК-КВЧ — группа крыс, подвергавшихся комбинированному воздействию хронического гипокинетического стресса (ГК) и низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ); ОС-КВЧ — комбинация воздействия острого стресса (ОС, на 10-е сут эксперимента) и превентивного 10-кратного низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ); ОКСС-КВЧ — комбинация воздействия оксидативного стресса (ОКСС) и превентивного 10-кратного низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (КВЧ).

Note: K — control; ОС — a group of rats exposed to acute stress; ГК — a group of rats exposed to chronic hypokinetic stress; ОКСС — a group of rats exposed to oxidative stress; КВЧ — a group of rats exposed to extremely high frequency electromagnetic radiation; ГК-КВЧ — a group of rats exposed to the combined effects of chronic hypokinetic stress (ГК) and low-intensity extremely high frequency electromagnetic radiation (КВЧ); ОС-КВЧ — a combination of acute stress (ОС, on day 10 of the experiment) and a preventive 10-fold low-intensity extremely high frequency electromagnetic radiation (КВЧ); ОКСС-КВЧ — a combination of oxidative stress (ОКСС) and a preventive ten-fold low-intensity extremely high frequency electromagnetic radiation (КВЧ).

После предварительного отбора животных разделили на 8 групп по 20 особей в каждой. Схема последовательности воздействия стресс-факторов и ЭМИ КВЧ в различных группах показана в табл. 1.

Интактные животные 1-й группы являлись биологическим контролем (К) и находились в течение 10 сут в обычных условиях вивария. Животные 2-й группы подвергались изолированному действию острого стресса (ОС) на 10-е сут. Животные 3-й группы подвергались действию хронического 10-суточного гипокинетического стресса (ГК). Животные 4-й группы подвергались на 10-е сут однократному воздействию оксидативного стресса (ОКСС), животные 5-й группы подвергались 10-кратному воздействию ЭМИ КВЧ. Животные 6-й группы подвергались одновременному действию хронического 10-суточного гипокинетического стресса и ЭМИ КВЧ (ГК+КВЧ), при этом КВЧ-воздействие осуществлялось 10-кратно комбинированно со стрессом. Животные 7-й группы подвергались 10-кратному превентивному ЭМИ КВЧ и действию острого стресса (на 10-е сут, ОС-КВЧ), а 8-й группы — превентивному 10-кратному воздействию ЭМИ КВЧ и действию оксидативного стресса (на 10-е сут, ОКСС-КВЧ).

Хронический стресс моделировали ограничением подвижности (гипокинезией, ГК), что достигалось помещением крыс в специальные кассеты из оргстекла (140×60×60 мм для каждой крысы), в которых они находились в течение 10 сут по 20 ч. В течение последующих 4 ч проводили экспериментальные исследования, кормление и уход за животными. Известно, что ограничение подвижности крыс в клетках-пеналах вызывает стрессовую реакцию, интенсивность которой зависит от степени «жёсткости» ГК [5]. Полученная экспериментальная модель позволила создать одинаковую степень «жёсткости» ГК для всех животных, что яв-

ляется необходимым условием для получения сопоставимых результатов.

Острую стресс-реакцию (ОС) индуцировали в модели теста «Вынужденное плавание» [15] в бассейне в течение 60 мин (уровень воды — 30 см, температура воды +20°C). За 24 ч до стрессорного воздействия животные всех групп были лишены пищи при свободном доступе к воде. Подробнее методика описана в работе [9].

Оксидативный стресс (острое повреждение сосудистого русла, ОКСС) у крыс индуцировали путём введения в хвостовую вену р-ра H₂O₂ 3% объёмом 0,2 мл. Контрольной группе животных вводился в хвостовую вену физ. р-р того же объёма.

КВЧ-воздействие на животных проводилось 10-кратно, в течение 30 мин ежедневно в утреннее время путём наложения на затылочную-воротниковую область волновода аппарата КВЧ-терапии «КВЧ-НД»: рабочая длина волны — 7,1 мм, плотность потока мощности облучения — 4–6 мВт/см² (ООО «Научно-коммерческая фирма РЭСЛА», Россия; Декларация соответствия № РОСС Ru. ME67.Д00227; Рег. удостовер. № ФСР 2007/00763 от 18.09.2007 г.).

Забор крови осуществляли на 10-е сут эксперимента, после проведения всех запланированных манипуляций и исследований из хвостовой вены. В пробах венозной крови испытуемых крыс на гематологическом анализаторе Mythic-18 («Orphee», Швейцария) определяли:

1) эритроцитарные показатели — количество эритроцитов, содержание гемоглобина (HGB), гематокрит (Ht), средний объём эритроцита (MCV), среднее содержание гемоглобина в одном эритроците (MCH), среднюю концентрацию гемоглобина в эритроците (MCHC);

2) лейкоцитарные показатели — количество лейкоцитов (WBC) и их субпопуляций — лимфоцитов (LYM), моноцитов (MON), гранулоцитов (GRA);

3) тромбоцитарные показатели — количество тромбоцитов (PLT), средний объём тромбоцитов (MPV), тромбокрит (PCT). В данном приборе реализованы методы импедансного подсчёта частиц и адсорбционной спектрофотометрии.

Статистическую обработку результатов проводили с использованием пакета Graph Pad Prizm 9.0 («GraphPad Software», США). Поскольку распределение значений переменных не подчинялось закону нормального распределения, то оценку достоверности межгрупповых различий проводили непараметрическим критерием множественных

сравнений Данна. Различия считались достоверными при $p \leq 0,05$. Данные представлены в виде медианы и межквартильного диапазона (25 и 75%).

Результаты и обсуждение

Эритроцитарные гематологические показатели и индексы самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ

Как показали результаты анализа эритроцитарных показателей и индексов венозной крови самцов крыс в контроле (табл. 2),

Таблица 2. Эритроцитарные гематологические показатели и индексы самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ

Table 2. Erythrocyte hematological parameters and indices of male rats under isolated exposure to stress factors of various origins and their combinations with electromagnetic radiation of extremely high frequency

Группа	Показатель					
	RBC, $10^{12}/л$	HGB, г/л	Ht, %	MCV, фл	MCHC, г/дл	MCH, пг
К (n=20)	7,80 (7,67; 8,13) 100,0%	129,5 (127,3; 135,8) 100,0%	42,90 (37,30; 51,40) 100,0%	56,55 (45,73; 67,13) 100,0%	29,60 (25,45; 35,93) 100,0%	16,55 (16,30; 17,58) 100,0%
КВЧ (n=20)	7,22 (6,97; 7,97) 92,5%	125,0 (123,0; 135,2) 96,5%	35,15 (33,98; 37,05) 81,9%*	46,48 (46,30; 67,13) 82,2%	36,15 (35,60; 36,48) 122,1*	16,95 (16,80; 17,70) 102,4%
ОС (n=20)	8,01 (7,75; 9,63) 102,7%	134,5 (124,8; 167,4) 103,9%	36,80 (34,45; 45,53) 85,8%	47,10 (44,78; 47,58) 83,3%	26,30 (36,03; 36,48) 122,6*	17,04 (16,18; 17,30) 103,0%
ГК (n=20)	8,79 (8,53; 8,99) 112,7%*	137,5 (135,3; 143,8) 106,2%	43,60 (42,13; 47,45) 101,6%	49,26 (48,40; 53,15) 87,1%	31,10 (29,40; 31,95) 105,1%	15,65 (15,33; 16,50) 94,6%
ОКСС (n=20)	6,39 (6,28; 7,64) 81,9%	115,3 (107,0; 127,8) 89,0%	34,74 (29,85; 38,40) 81,0%*	50,10 (47,03; 67,45) 88,6%	35,45 (31,93; 35,98) 119,8%	17,59 (16,73; 18,43) 102,7%
ОС-КВЧ (n=20)	7,83 (7,35; 8,11) 100,4%	133,6 (126,3; 146,2) 95,0%	35,40 (33,63; 37,45) 82,5%*	46,20 (45,53; 47,40) 81,7%***	36,53 (36,11; 36,68) 123,5%***	17,21 (17,00; 17,48) 104,0%
ГК-КВЧ (n=20)	7,93 (7,70; 8,11) 101,7%*	123,0 (122,0; 129,8) 95,0%***	39,45 (38,15; 42,13) 92,0%	50,13 (48,73; 52,63) 88,6%	31,35 (29,40; 32,10) 105,9%	15,65 (15,08; 16,46) 94,6%
ОКСС-КВЧ (n=20)	8,31 (7,85; 8,90) 106,5%	142,4 (136,5; 149,7) 105,9%***	37,75 (35,65; 40,08) 88,0%	45,40 (45,23; 45,88) 80,2%	36,80 (36,45; 37,00) 124,3%***	17,00 (16,80; 17,23) 102,7%

Примечание: указаны медиана (25% и 75% квантили). * — $p \leq 0,05$, ** — $p \leq 0,01$, *** — $p \leq 0,001$, где p — достоверность отличий значений показателя по сравнению с контролем; ### — $p \leq 0,001$, где p — достоверность межгрупповых различий значений показателя в группах ГК и ГК-КВЧ; *** — $p \leq 0,001$, где p — достоверность межгрупповых различий значений показателя в группах ОКСС и ОКСС-КВЧ.

Note: the median (25th and 75th quartiles). * — $p \leq 0.05$, ** — $p \leq 0.01$, *** — $p \leq 0.001$, where p — statistically significant compared to the control; ### — $p \leq 0.001$, where p — statistically significant intergroup differences between the groups ГК and ГК-КВЧ; *** — $p \leq 0.001$, where p — statistically significant intergroup differences between the groups ОКСС and ОКСС-КВЧ.

данные показатели соответствовали физиологической норме, приведённой в справочниках [6, 11, 12].

Как показано в табл. 2, только в условиях гипокинетического (ГК) стресса наблюдалось увеличение количества эритроцитов на 12,7% ($p<0,05$). При этом комбинированное воздействие ЭМИ КВЧ с данным стрессором (ГК-КВЧ) достоверно снижало этот показатель на 11,0% ($p<0,05$), возвращая его к уровню контроля (количество эритроцитов при воздействии комбинации факторов ГК-КВЧ не отличалось достоверно от значений этого показателя в контроле).

Согласно литературным данным [1], рост количества эритроцитов был продемонстрирован на 7-е сут антиортостатической гипокинезии у мужчин, что согласуется с полученными данными. Следует отметить, что эффект 10-кратного КВЧ-воздействия на количество эритроцитов не отличался от контроля, что согласуется с литературой [4].

Таким образом, комбинация ГК-КВЧ способствует возникновению и проявлению нового физиологического эффекта в отношении количества эритроцитов, не свойственного каждому из этих факторов в отдельности. ЭМИ КВЧ в комбинации с ГК оказывает стресспротекторное действие, приводя данный показатель в пределы нормы.

Содержание гемоглобина (табл. 2) при комбинации ГК-КВЧ снижалось на 11,2% ($p<0,001$) по сравнению с ГК, а при комбинации оксидативного стресса и КВЧ (ОКСС-КВЧ), наоборот, повышалось на 16,7% ($p<0,001$) по сравнению с изолированным действием ОКСС, приводя данные показатели в рамки физиологической нормы, что также указывает на некоторый антистрессорный/гомеостатический эффект ЭМИ КВЧ.

Гематокрит при ОКСС снижался на 19,0% ($p<0,05$), а комбинация ОКСС-КВЧ нивелировала этот эффект, т. к. в этом случае гематокрит существенно не отличался

от контроля. Острый стресс (ОС) не оказывал влияния на гематокрит венозной крови животных, тогда как комбинация ОС-КВЧ снижала этот показатель по сравнению с контролем на 17,5% ($p<0,05$), что свидетельствует о некоторой гидратации плазмы [8]. Однако во всех этих случаях значения гематокрита находились в пределах физиологической нормы для самцов крыс [6, 11].

Похожая картина наблюдалась и в отношении эритроцитарного индекса MCV (табл. 2): комбинации ОС-КВЧ и ОКСС-КВЧ снижали этот показатель по сравнению с контролем на 18,3% ($p<0,01$) и 19,8% ($p<0,01$) соответственно, что говорит об увеличении числа микроцитов среди эритроцитов в ответствии с работой [8]. При этом MCV в группе ОКСС-КВЧ был достоверно ниже такового в группе ОКСС ($p<0,001$).

Индекс MCHC (табл. 2) существенно возрастал относительно контроля после воздействия КВЧ — на 22,1% ($p<0,05$), после воздействия ОС — на 22,6% ($p<0,01$), ОС-КВЧ — на 23,5% ($p<0,001$) и ОКСС-КВЧ — на 24,3% ($p<0,001$). Это согласуется с литературными данными в отношении КВЧ, ГК и ОС [3, 6]. Так, в работе [1] было показано, что в ранний период пребывания в условиях антиортостатической гипокинезии (7-е сут) содержание гемоглобина в эритроцитах увеличивалось при отсутствии существенных изменений других показателей.

Лейкоцитарные гематологические показатели самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ

В контроле уровень количества лейкоцитов венозной крови самцов крыс соответствовал физиологической норме, приведённой в справочнике [11].

Количество лейкоцитов (табл. 3) снижалось при действии ОКСС (на 19,6%; $p<0,05$) и его комбинации с КВЧ (ОКСС-КВЧ, на 23,9%; $p<0,05$) по сравнению с контролем, при этом данный параметр не выходил за пределы физиологической нор-

Таблица 3. Лейкоцитарные гематологические показатели и индексы самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ

Table 3. Leukocyte hematological parameters and indices of male rats under isolated exposure to stress factors of various origins and their combinations with electromagnetic radiation of extremely high frequency

Группа	Показатель			
	WBC, 10 ⁹ /л	LYM, 10 ⁹ /л	MON, 10 ⁹ /л	GRA, 10 ⁹ /л
К (n=20)	9,2 (8,05; 12,58) 100,0%	5,25 (4,10; 7,43) 100,0%	1,80 (1,71; 1,80) 100,0%	2,25 (1,93; 2,98) 100,0%
КВЧ (n=20)	9,35 (6,73; 12,40) 101,6%	4,05 (2,93; 7,72) 77,1%	2,25 (1,63; 3,20) 125,0%	1,95 (0,80; 2,58) 86,7%
ОС (n=20)	9,65 (8,68; 18,13) 104,9%	5,70 (4,83; 10,9) 108,6%	2,40 (1,70; 5,15) 133,3%	2,20 (1,63; 2,60) 97,8%
ГК (n=20)	10,40 (9,08; 14,23) 113,0%	5,95 (4,60; 8,40) 113,3%	2,03 (1,92; 2,58) 111,1%	2,65 (2,23; 3,40) 117,8%
ОКСС (n=20)	7,40 (5,38; 7,67) 80,4%*	4,20 (3,63; 5,28) 80,0%	1,75 (1,03; 2,20) 97,2%	0,50 (0,30; 1,93) 44,4%*
ОС-КВЧ (n=20)	7,32 (6,20; 8,90) 79,6%*	4,65 (3,48; 5,35) 88,6%	1,50 (0,93; 1,88) 83,3%#	2,05 (1,73; 2,40) 91,1%
ГК-КВЧ (n=20)	9,15 (8,05; 12,55) 99,5%	5,25 (4,03; 7,40) 100,6%	1,80 (1,70; 2,26) 101,5%	2,30 (1,90; 3,45) 102,2%
ОКСС-КВЧ (n=20)	7,00 (6,25; 7,88) 76,1%*	2,90 (2,50; 3,58) 55,2%*	2,00 (1,88; 2,45) 105,6%	1,35 (0,51; 2,05) 60,0%*

Примечание: указаны медиана (25% и 75% квантили). * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, где p – достоверность отличий значений показателя по сравнению с контролем; # – $p \leq 0,01$, где p – достоверность межгрупповых различий значений показателя в группах ГК и ГК-КВЧ.

Note: the median (25th and 75th quartiles). * – $p \leq 0,05$, ** – $p \leq 0,01$, where p – statistically significant compared to the control; # – $p \leq 0,01$, where p – statistically significant intergroup differences between the groups ГК and ГК-КВЧ.

мы. Эффект 10-кратного КВЧ-воздействия на количество лейкоцитов не отличался от контроля, что согласуется с данными, полученными в работе [4]. Кроме этого, комбинация ОС-КВЧ снижала количество лейкоцитов на 20,4% ($p < 0,05$) по сравнению с контролем.

Количество лимфоцитов (табл. 3) снижалось на 44,8% ($p < 0,01$) относительно контроля только при воздействии комбинации ОКСС-КВЧ, однако у большинства особей этот показатель находился в пределах референсного интервала, как и его медиана [13]. По другим литературным данным, этот показатель ниже физиологической нормы [6].

Количество гранулоцитов (табл. 3) существенно снижалось при изолированном воз-

действии ОКСС (на 55,6%; $p < 0,01$) и комбинации ОКСС-КВЧ (на 40,0%; $p < 0,05$), что свидетельствует о травматических повреждениях, свободнорадикальном повреждении мембран клеток [3, 8], однако при комбинации ОКСС-КВЧ повреждающее действие изолированного ОКСС ослаблялось.

Тромбоцитарные гематологические показатели самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ

Из всего пула тромбоцитарных гематологических показателей (табл. 4) самцов крыс увеличивался только средний объем тромбоцита (MPV) в условиях комбинированного применения ГК-КВЧ по сравнению

Таблица 4. Тромбоцитарные гематологические показатели и индексы самцов крыс при изолированном воздействии стресс-факторов различной природы и их комбинаций с ЭМИ КВЧ
Table 4. Platelet hematological parameters and indices of male rats under isolated exposure to stress factors of various origins and their combinations with electromagnetic radiation of extremely high frequency

Группа	Показатель		
	PLT, 10 ⁹ /л	MPV, фл	PCT, %
К (n=20)	297,5 (173,5; 402,5) 100,0%	8,20 (7,63; 8,68) 100,0%	24,5 (13,9; 33,4) 100,0%
КВЧ (n=20)	181,0 (161,3; 306,5) 60,8%	7,60 (6,63; 9,10) 92,7%	17,0 (10,9; 21,4) 69,5%
ОС (n=20)	159,5 (128,3; 433,3) 53,6%	7,35 (6,75; 9,81) 89,6%	14,6 (11,2; 30,6) 59,7%
ГК (n=20)	337,5 (197,0; 451,3) 113,4%	8,05 (7,53; 8,65) 98,2%	29,3 (16,6; 35,2) 119,8%
ОКСС (n=20)	175,0 (112,5; 228,3) 58,8%	8,75 (8,15; 9,68) 106,7%	15,9 (11,7; 20,8) 65,0%
ОС-КВЧ (n=20)	209,0 (136,0; 349,3) 70,3%	7,05 (6,45; 8,28) 86,0%	14,3 (11,5; 25,5) 58,3%
ГК-КВЧ (n=20)	387,0 (222,0; 480,3) 130,8%	10,20 (9,55; 10,20) 124,4% ^{*, **}	29,7 (22,1; 44,5) 135,0%
ОКСС-КВЧ (n=20)	200,0 (106,5; 330,0) 67,2%	7,95 (7,13; 8,55) 97,0%	14,7 (6,8; 27,2) 59,9%

Примечание: указаны медиана (25% и 75% квантили). ** — $p \leq 0,01$, где p — достоверность отличий значений показателя по сравнению с контролем; ## — $p \leq 0,01$, где p — достоверность межгрупповых различий значений показателя в группах ГК и ГК-КВЧ.
Note: the median (25th and 75th quartiles). ** — $p \leq 0.01$, where p — statistically significant compared to the control; ## — $p \leq 0.01$, where p — statistically significant intergroup differences between the groups ГК and ГК-КВЧ.

с контролем (на 24,4%; $p \leq 0,01$) и по сравнению с изолированным воздействием КВЧ (на 31,7%; $p < 0,001$).

Таким образом, при комбинации ГК-КВЧ увеличивались только объёмные показатели тромбоцитов.

Заключение

Эритроцитарные гематологические показатели самцов крыс в большей степени изменялись при изолированном воздействии продолжительного стресс-фактора (ГК) и высокой интенсивности (ОКСС), чем кратковременного (ОС). В условиях ГК относительно контроля увеличивалось количество эритроцитов, при ОКСС снижался гематокрит, а при ОС возрастал ин-

декс МСНС. ГК-КВЧ по сравнению с ГК снижало количество эритроцитов и уровень гемоглобина, возвращая эти показатели к уровню контроля. ОКСС-КВЧ, наоборот, нивелировало эффект снижения гематокрита при ОКСС, но снижало MCV и повышало индекс МСНС. Компенсация стрессорного воздействия в данном случае происходила ещё и за счёт снижения объёма эритроцитов и увеличения суммарного содержания в них гемоглобина. Лейкоцитарные гематологические показатели самцов крыс изменялись только при изолированном воздействии ОКСС и комбинированном ОКСС-КВЧ, при этом комбинация ОКСС с ЭМИ КВЧ ослабляла стрессорный повреждающий эффект

ОКСС. При комбинации ГК-КВЧ увеличивались только объёмные показатели тромбоцитов.

Применение ЭМИ КВЧ в условиях моделирования у животных стресса разной продолжительности и интенсивности ока-

зывает стресспротекторный эффект, что делает данный физический фактор перспективным для дальнейших исследований его биологических эффектов в разных моделях патологических состояний, сопровождающихся развитием стресс-реакции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Иванова С.М., Моруков Б.В., Ярлыкова Ю.В., Лабетская О.И., Левина А.А., Козинец Г.И. Состояние системы крови у мужчин при длительной антиортостатической гипокинезии. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2005;39(6):17–22. [Ivanova S.M., Morukov B.V., Yarlykova Yu.V., Labetskaya O.I., Levina A.A., Kozinets G.I. Sostoyanie sistemy krovi u muzhchin pri dlitel'noy antiortostaticheskoy gipokinezii [The red blood system in men during long-term head-down bed rest]. *Aviakosmicheskaya i ekologicheskaya meditsina* [Aerospace and Environmental Medicine]. 2005;39(6):17–22. (In Russian)].
2. Казаринов К.Д., Щелконогов В.А., Чеканов А.В. Изучение чувствительности клеток крови человека к микроволновому излучению. *Журнал радиоэлектроники*. 2019;8:3–22. [Kazarinov K.D., Shchelkonogov V.A., Chekanov A.V. Izuchenie chuvstvitel'nosti kletok krovi cheloveka k mikrovolnovomu izlucheniyu [Studying the sensitivity of human blood cells to microwave radiation]. *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radio Electronics]. 2019;8:3–22. (In Russian)]. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.8.10
3. Камышников В.С. *Справочник по клинико-биохимическим исследованиям и лабораторной диагностике*. М.: МЕД-Пресс-информ, 2004. [Kamyshnikov V.S. *Spravochnik po kliniko-biokhimicheskim issledovaniyam i laboratornoy diagnostike* [Handbook of clinical and biochemical research and laboratory diagnostics]. Moscow, MED-PRESS-inform Publ., 2004. (In Russian)].
4. Карева Н.П., Ефремов А.В., Лосева М.И., Агеева Т.А., Позднякова С.В. Влияние миллиметровых волн на кроветворную систему в условиях нормы и в постцитостатический период. *Вестник НГУ. Серия: Биология, клиническая медицина*. 2007;5(1):74–80. [Kareva N.P., Efremov A.V., Loseva M.I., Ageeva T.A., Pozdnyakova S.V. Vliyaniye millimetrovyykh voln na krovetvornuyu sistemu v usloviyakh normy i v postsitostaticheskiy period [Effect of millimeter waves of difference parameters on hemato-poietic system under normal conditions and in postcytostatic period]. *Vestnik NGU. Seriya: Biologiya, klinicheskaya meditsina* [Bulletin of the NSU. Series: Biology, clinical medicine]. 2017;5(1):74–80. (In Russian)].
5. Коваленко Е.А., Гуровский Н.Н. Гипокинезия. М.: Медицина, 1980. [Kovalenko Ye.A., Gurovskiy N.N. *Gipokineziya* [Hypokinesia]. Moscow: Meditsina Publ., 1980. (In Russian)].
6. Макаров В.Н., Макарова М.Н. *Физиологические, биохимические и биометрические показатели нормы экспериментальных животных*. Справочник. СПб.: Изд-во «ЛЕМА», 2013. [Makarov V.N., Makarova M.N. *Fiziologicheskie, biokhimicheskie i biometricheskie pokazateli normy eksperimental'nykh zhivotnykh* [Physiological, biochemical and biometric indicators of the norm of experimental animals]. Spravochnik [Guide]. Saint Petersburg: LEMA Publ., 2013. (In Russian)].
7. Масляков В.В., Илюхин А.В. Воздействие крайне высоких частот на показатели лейкоцитов периферической крови у пациентов с хроническим генерализованным пародонтитом. *Медицина*. 2017;1:80–88. [Maslyakov V.V., Ilyukhin A.V. Vozdeystvie kryayne vysokikh chastot na pokazateli leykotsitov perifericheskoy krovi u patsientov s khronicheskim generalizovannym parodontitom [Impact of extremely high frequencies on indices of peripheral blood leukocytes in patients with the chronic generalized periodontal disease]. *Meditsina* [Medicine]. 2017;1:80–88. (In Russian)].
8. Небыльцова О.В., Климова Ж.А., Носенко Г.А., Бойко И.В., Клишья М.А., Чернышова Л.А., Князева Л.П., Маликова С.В., Данилова И.Е., Абашева С.Н., Дегтяренко О.А., Прищепа Л.А. *Лабораторный справочник Синэво*. К.: ООО «Доктор-Медиа», 2011. [Nebyltsova O.V., Klimova Zh.A., Nosenko G.A., Boyko I.V., Klishnya M.A., Chernyshova L.A., Knyazeva L.P., Malikova S.V., Danilova I.E., Abasheva S.N., Degtyarenko O.A., Prishchepa L.A. *Laboratorynyy spravochnik Sinevo* [Synevo Laboratory Reference Book]. Kiev: Doktor-Media Publ., 2011. (In Russian)].
9. Раваева М.Ю., Чуян Е.Н. Адаптация тканевой микрогемодинамики к условиям комбинации стрессовых факторов. *Учёные записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. Биология. Химия*. 2018;70(4):165–179. [Ravaeva M.Yu., Chuyan E.N. Adaptatsiya tkanevoy mikrohemodinamiki k usloviyam kombinatsii stressovykh faktorov [Adaptation of tissue microhemodynamics to the conditions of combination of stress factors]. *Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta imeni V.I. Vernadskogo. Biologiya. Khimiya* [Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry]. 2018;70(4):165–179. (In Russian)].
10. Селье Г. *Очерки об адаптационном синдроме*. М.: Медгиз, 1960:254–255. [Sel'ye G. *Ocherki ob adaptat-*

- sionnom syndrome* [Essays on the adaptation syndrome]. Moscow: Medgiz Publ., 1960:254–255. (In Russian).
11. Трахтенберг И.М., Сова Р.Е., Шефтель В.А., Оникиенко Ф.А. Проблема нормы в токсикологии (современные представления и методические подходы, основные параметры и константы). М.: Медицина, 1991. [Trahtenberg I.M., Sova R.E., Sheftel V.A., Onikienko F.A. Problema normy v toksikologii (sovremennye predstavleniya i metodicheskie podkhody; osnovnye parametry i konstanty) [The problem of norm in toxicology (modern concepts and methodological approaches, basic parameters and constants)]. Moscow: Medicina Publ., 1991. (In Russian)].
12. Уша Б.В., Фатеева Е.И., Концевая С.Ю. Организация доклинических исследований с использованием лабораторных животных в соответствии с правилами GLP. М.: МГУПП, 2016. [Usha B.V., Fateeva E.I., Kontseva S.Yu. Organizatsiya doklinicheskikh issledovaniy s ispol'zovaniem laboratornykh zhivotnykh v sootvetstviy s pravilami GLP [Organization of preclinical studies using laboratory animals in accordance with the rules GLP]. Moscow: MGUPP Publ., 2016. (In Russian)].
13. Юшков Б.Г., Корнева Е.А., Черешнев В.А. Понятие нормы в физиологии и патофизиологии. Физиологические константы лабораторных животных. Екатеринбург: УрО РАН, 2021. [Yushkov B.G., Korneva E.A., Chereshev V.A. Ponyatie normy v fiziologii i patofiziologii. Fiziologicheskie konstanty laboratornykh zhivotnykh [The concept of norm in physiology and pathophysiology. Physiological constants of laboratory animals]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2021. (In Russian)].
14. Overmier J.B., Murison R., Johnsen T.B. Prediction of individual vulnerability to stress-induced gastric ulcerations in rats: A factor analysis of selected behavioral and biological indices. *Physiol. Behav.* 1997;61(4):555–562. DOI: 10.1016/s0031-9384(96)00502-1
15. Porsolt R.D., McArthur R.A., Lenegre A. *Psychotropic screening procedures. Methods in Behavioral Pharmacology*. Ed. by F. van Haaren. Elsevier, 1993:23–51.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Раваева Марина Юрьевна*, к.б.н., доц., ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»;
e-mail: ravaevam@yandex.ru

Marina Yu. Ravaeva*, Cand. Sci. (Biol.), Assoc. Prof., V.I. Vernadsky Crimean Federal University;
e-mail: ravaevam@yandex.ru

Черетаев Игорь Владимирович, к.б.н., ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»;
e-mail: cheretaev86@yandex.ru

Igor V. Cheretaev, Cand. Sci. (Biol.), V.I. Vernadsky Crimean Federal University;
e-mail: cheretaev86@yandex.ru

Чуян Елена Николаевна, д.б.н., проф., ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»;
e-mail: elena-chuyan@rambler.ru

Elena N. Chuyan, Dr. Sci. (Biol.), Prof., V.I. Vernadsky Crimean Federal University;
e-mail: elena-chuyan@rambler.ru

Нагорская Мария Викторовна, ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского»;
e-mail: zaygolnikova@mail.ru

Mariya V. Nagorskaya, V.I. Vernadsky Crimean Federal University;
e-mail: zaygolnikova@mail.ru

Галенко-Ярошевский Павел Александрович, чл.-корр. РАН, д.м.н., проф., ФГБОУ ВО «Кубанский государственный медицинский университет» Минздрава России;
e-mail: Galenko.Yarochevsky@gmail.com

Pavel A. Galenko-Yaroshevskii, Corr. Member of the RAS, Dr. Sci. (Med.), Prof., Kuban State Medical University of the Ministry of Health Care of Russia;
e-mail: Galenko.Yarochevsky@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author