

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco606052>

Влияние вращающихся электрических полей на метаболические показатели крови: экспериментальное исследование

Т.С. Воронцова, Н.Н. Васильева, Л.С. Исакова

Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Стресс является неотъемлемым аспектом жизни человека и животного. Актуальность проблемы стресса и его негативного влияния на современного человека трудно переоценить, поскольку каждый из нас испытывал в жизни воздействие стрессовых факторов различной природы, последствиями которого являются патологические состояния самых разных органов и систем. В состоянии стресса, который является причиной 80% заболеваний, находится до 70% населения нашей страны. Именно поэтому огромное количество исследований посвящено этой проблеме.

Цель. Изучить влияние техногенного вращающегося электрического поля на метаболические показатели крови у экспериментальных животных.

Материалы и методы. В сыворотке крови 54 белых крыс-самцов определяли концентрацию 11-оксикортикостероидов, глюкозы, С-реактивного белка, суммарный уровень сиаловых кислот, а также активность гепатоспецифических ферментов в крови (аспартатаминотрансферазу, аланинаминотрансферазу, щелочную фосфатазу) в контроле, на 10-й и 20-й день влияния техногенного вращающегося электрического поля. Для определения стрессоустойчивости животных тестировали по методике «открытого поля», затем распределяли в группы (стрессоустойчивые, стрессонеустойчивые и амбивалентные).

Результаты. На 10-й день действия техногенного вращающегося электрического поля в крови всех животных отмечался рост исследуемых показателей: 11-оксикортикостероидов — у стрессоустойчивых и стрессоамбивалентных в 10 раз ($p=0,011$), у стрессонеустойчивых в 12 раз ($p=0,016$); уровень глюкозы — у стрессоустойчивых на 47% ($p=0,019$), у стрессонеустойчивых на 60% ($p=0,011$), у стрессоамбивалентных на 52% ($p=0,011$); С-реактивный белок — в 8 ($p=0,019$), 23 ($p=0,010$) и 17 ($p=0,012$) раз; уровень суммарных сиаловых кислот — на 16% ($p=0,024$), 25% ($p=0,020$) и 18% ($p=0,021$) соответственно, в том числе возросла активность гепатоспецифических ферментов: аспартатаминотрансферазы — у стрессоустойчивых в 3,7 раза ($p=0,024$), у стрессонеустойчивых в 5,4 раза ($p=0,031$), у стрессоамбивалентных в 4 раза ($p=0,030$); аланинаминотрансферазы — в 2,4 ($p=0,024$), 2,0 ($p=0,02$) и 2,3 ($p=0,021$) раза; щелочной фосфатазы — в 1,5 ($p=0,032$), 2,8 ($p=0,020$) и 1,7 ($p=0,030$) раза соответственно. На 20-й день все исследуемые показатели оставались повышенными относительно контрольных значений во всех группах.

Заключение. Воздействие техногенного вращающегося электрического поля приводит к изменениям биохимического профиля крови — гипергликемии, увеличению маркеров повреждения клеток.

Ключевые слова: техногенное вращающееся электрическое поле; стресс; стрессоустойчивость; 11-оксикортикостероиды; глюкоза; С-реактивный белок; суммарные сиаловые кислоты; аспартатаминотрансфераза; аланинаминотрансфераза; щелочная фосфатаза.

Как цитировать:

Воронцова Т.С., Васильева Н.Н., Исакова Л.С. Влияние вращающихся электрических полей на метаболические показатели крови: экспериментальное исследование // Экология человека. 2023. Т. 30, № 10. С. 749–758. doi: <https://doi.org/10.17816/humeco606052>

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco606052>

Effects of rotating electric fields on blood metabolic indicators: an experimental study

Tatyana S. Vorontsova, Natalia N. Vasilyeva, Larisa S. Isakova

Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: Stress is an integral part of life in both humans and animals. Up to 70% of the Russian population have reported a certain degree of stress associated with approximately 80% of diseases. This heavy burden of stress explains a significant body of research on the issue of stress and its associations with health indicators.

AIM: To study the effects of rotating electric fields on blood metabolic parameters in experimental animals with different levels of resistance to stress.

MATERIALS AND METHODS: A total of 54 non-inbred white male rats comprised the sample. We measured serum levels of 11-hydroxycorticosteroids, glucose, C-reactive protein, total sialic acids and the activity of hepatospecific enzymes, such as aspartate transferase, alanine transferase, and alkaline phosphatase at the 10th and the 20th day of exposure to a man-made rotating electric field and in the non-exposed control group. By the level of resistance to stress all rats were divided into stress-resistant, stress-unresistant and ambivalent groups using the "open field" method.

RESULTS: On the 10th day of exposure, the levels of 11-hydroxycorticosteroids, glucose, C-reactive protein, total sialic acids increased in all three groups of animals. The activity of aspartate transferase, alanine transferase, and alkaline phosphatase also increased in all rats. On the 20th day, the studied parameters remained elevated compared to the control group. The most pronounced changes were observed in the group of stress-unresistant individuals.

CONCLUSION: Our results demonstrate significant effects of rotating electric fields on blood metabolic indicators in rats. The degree of change depends on individual level of stress resistance.

Keywords: rotating electric field; stress; stress resistance; 11-hydroxycorticosteroids; glucose; C-reactive protein; total sialic acids; aspartate transferase; alanine transferase; alkaline phosphatase.

To cite this article:

Vorontsova TS, Vasilyeva NN, Isakova LS. Effects of rotating electric fields on blood metabolic indicators: an experimental study. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2023;30(10):749–758. doi: <https://doi.org/10.17816/humeco606052>

Received: 05.10.2023

Accepted: 15.01.2024

Published online: 26.01.2024

ОБОСНОВАНИЕ

Стресс является неотъемлемым аспектом жизни человека и животного. Актуальность проблемы стресса и его негативного влияния на современного человека трудно переоценить. До 70% населения нашей страны находится в состоянии стресса, а именно стресс является причиной 80% заболеваний [1–3], что определяет значительное количество исследований, посвящённых этой проблеме.

В современной литературе достаточно часто встречаются исследования по вопросам формирования стресса, механизмам развития адаптационных возможностей организма человека и животного, в которых достигнуты значительные успехи, однако проблема стресса остаётся актуальной и востребованной до настоящего времени.

Согласно современной психосоматической концепции, при хроническом стрессе адаптивные функции организма значительно ослабевают, и, как следствие, формируются соматические заболевания, где преимущественную и особую роль играют психоэмоциональные факторы. Наряду с классическими адренергическими механизмами проявления стресса присоединяются и метаболические изменения в органах и тканях, физиологическая функция которых направлена на модулирование системы неспецифических адаптивно-защитных механизмов [1, 4].

В настоящее время электромагнитное поле рассматривают в качестве одного из глобальных экологических факторов, влияющих на организм человека и животного. Интерес к данной проблеме возрастает в связи с постоянным повышением уровня электромагнитного излучения техногенного происхождения, а также необходимостью гигиенического нормирования фоновых электромагнитных полей. Одновременно с этим представляет интерес биологическое действие электромагнитного поля в аспекте изучения его характеристик, близких к естественным. В ряде работ достоверно установлена высокая биологическая активность крайне слабых электромагнитных полей, которая имеет повреждающее и вредоносное действие, тем не менее молекулярные и клеточные механизмы их воздействия на биологические системы остаются неясными [5–8].

Значительное число экспериментальных исследований в области электромагнитной биологии посвящено изучению переменных электрических полей, при этом стоит отметить, что конфигурация электрического поля в зоне линии электропередач совершенно иная: здесь формируется вращающееся электрическое поле (ВЭП), которое отличается от переменного тем, что вектор поляризации совершает вращение, то есть для ВЭП характерна круговая (или эллиптическая) поляризация, а для переменного — линейная. Вращающееся электрическое поле включает в себя электрическую и магнитную составляющую, но при низкой частоте — 50 Гц — магнитная составляющая ВЭП незначительная [7].

Специфика ВЭП определяется не степенью поглощения энергии, а энергетической насыщенностью объекта

и его особенностями строения: именно это является причиной проявления действия ВЭП даже при минимальных воздействиях. Последствия влияния этих полей на биологические объекты изучены недостаточно.

Цель исследования — изучить влияние техногенного ВЭП на метаболические показатели крови у экспериментальных животных.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Дизайн исследования

Проспективное экспериментальное контролируемое исследование проведено на 54 взрослых белых беспородных, без генетической детерминированности крысах-самцах массой 180–220 г в возрасте 12–15 недель.

Методы регистрации исходов

До исследования с целью определения стрессоустойчивости крыс тестировали по методике «открытого поля» [4, 9] (круглая площадка диаметром 90 см, разделённая на 19 центральных и 18 периферических секторов, ограниченная с краю стенками высотой 40 см; источник света — 100 Вт, сверху). При тестировании регистрировали горизонтальную и вертикальную двигательную активность, латентный период первого движения, латентный период выхода в центр, количество пересечённых квадратов. Для вычисления индекса активности сумму числа пересечённых периферических и центральных секторов делили на сумму латентного периода первого движения и выхода в центр поля [9]. Согласно полученным результатам, особи были распределены следующим образом: стрессоустойчивые (СУ) — $K_{уст} = 2,00–5,00$, где $K_{уст}$ — коэффициент стрессоустойчивости и его диапазон равен от 0,3 до 5,0; стрессонеустойчивые (СН) — $K_{уст} = 0,30–0,70$; стрессоамбивалентные (СА) — $K_{уст} = 0,80–1,99$.

Животных подвергали воздействию техногенного ВЭП [10]. ВЭП-оборудование собрано на базе физической модели линии электропередачи (трансформатор, электроды, конденсатор, резистор). Напряжение между электродами использовали в качестве опорного напряжения, относительно которого при помощи фазосдвигающей цепочки, образованной последовательно и на конце соединёнными конденсатором и резистором, образовывалось второе напряжение со сдвигом фазы ($\alpha 45^\circ$), которое также поступало на электроды. Между электродами формировалось ВЭП, физическое действие которого определялось суперпозицией двух ортогональных полей: амплитудные значения напряжённости — 30,5 и 75,9 В/м (Вольт/метр) соответственно. Поля изменялись по синусоидальному закону с частотой 50 Гц. Электропитание подавалось от сети переменного тока (220 В).

Выполнено две серии исследований длительностью 10 ($n=18$) и 20 ($n=18$) дней, во время которых животных помещали внутрь установки ежедневно, в первой

половине дня, на 60 минут. Контролем служили животные ($n=18$), которые находились в установке без её включения в сеть.

Животных выводили из эксперимента утром натошак методом декапитирования, используя кратковременный наркоз, на 10-й и 20-й дни опыта.

Для верификации стресса в плазме животных определяли содержание гормонов надпочечников (11-оксикортикостероиды, 11-ОКС) по флуоресценции в серноспиртовом растворе [11]; концентрацию С-реактивного белка (СРБ) определяли методом флуоресцентного поляризованного иммуноанализа на анализаторе TDxFLx (Abbott Laboratories, США), уровень суммарных сиаловых кислот — фотометрическим методом (Сиалотест, Россия); биохимические исследования (глюкоза, аспартатамино-трансфераза, аланинаминотрансфераза, щелочная фосфатаза) проводили на анализаторе Stat Fax (США) до начала исследования, на 10-й и 20-й дни ВЭП.

Этическая экспертиза

Крыс содержали в сертифицированном виварии ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России с соблюдением стандартных условий, свободным доступом к воде и пище.

Исследование осуществляли с учётом принципов биоэтики, изложенных в этическом кодексе (Международные рекомендации по проведению медико-биологических исследований с использованием животных, 1985¹), и приказом Минздравсоцразвития РФ «Об утверждении правил лабораторной практики»².

Исследование одобрено решением локального комитета по этике при ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России, протокол № 607 от 22.05.2018.

Статистический анализ

Для статистического исследования использовали программы Statistica 10.0 for Windows, Microsoft Excel 2007. Для проверки на нормальность распределения величин использовали графический статистический метод оценки Шапиро–Уилка. Для определения статистической значимости между группами применяли непараметрический двусторонний критерий Манна–Уитни, для определения статистической значимости между несколькими независимыми группами — критерий Краскела–Уоллиса.

Результаты представлены в виде медианы (Me), межквартильных интервалов (25–75-й процентиля, Q_1 – Q_3). Различия между группами признавали статистически значимыми при $p < 0,05$.

Для определения корреляционной связи использовали ранговый тест Спирмена. Коэффициент корреляции (r) интерпретировали следующим образом: 0 — связь между признаками отсутствует; $\leq 0,3$ — слабая прямая связь; 0,3–0,7 — прямая связь средней силы; 0,7–1 — сильная прямая связь; 1 — полная прямая связь; < 0 — имеется обратная связь между признаками (интерпретация аналогична вышеприведённой) [12].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты исследования

Для верификации стресса в плазме крыс определяли гормоны надпочечников по концентрации 11-ОКС. Так, на 10-й день воздействия ВЭП (табл. 1–3) в сыворотке крови всех животных наблюдался резкий рост 11-ОКС: у крыс групп СУ и СА показатель повысился в 10 раз ($p=0,011$) по сравнению с контролем, в группе СН — в 12 раз ($p=0,016$).

Известно, что за счёт окисления глюкозы, являющейся основным энергетическим субстратом для клеток, обеспечивается до 55% потребности организма в энергии, которая идёт на стимуляцию синтеза гормонов и ферментов, повышает адаптивные возможности организма [4, 13]. На 10-й день ВЭП у всех животных отмечалось нарастание уровня глюкозы. Так, в группе СУ повышение данного показателя составило 47% ($p=0,019$) по сравнению с контрольной группой, у СН концентрация глюкозы увеличилась на 60% ($p=0,011$), у СА — на 52% ($p=0,011$).

Маркером повреждения тканей является повышение в крови СРБ. Важно отметить, что СРБ является хоть и чувствительным, но весьма неспецифическим показателем системного повреждения, и уровень этого белка может повышаться при различных состояниях [14, 15]. На 10-й день влияния ВЭП в сыворотке крови всех животных отмечался резкий рост концентрации СРБ — в 8 ($p=0,019$), 23 ($p=0,010$) и 17 ($p=0,012$) раз соответственно в группах СУ, СН и СА.

На 10-й день влияния ВЭП в сыворотке крови всех животных наблюдался рост концентрации суммарных сиаловых кислот — основных концевых углеводных комплексов гликопротеинов [16–19]. Так, в группе СУ рост данного показателя по сравнению с контролем составил 16% ($p=0,024$), у СН — 25% ($p=0,020$), у СА — 18% ($p=0,021$). Высокий уровень суммарных сиаловых кислот в сыворотке крови животных при воздействии ВЭП свидетельствует об интенсивных процессах катаболизма углеводсодержащих биополимеров [20, 21].

На 20-й день воздействия ВЭП концентрация 11-ОКС не изменилась, и показатель статистически значимо

¹ Международные рекомендации (этический кодекс) по проведению медико-биологических исследований с использованием животных. Основные принципы [Интернет]. Режим доступа: https://www.volgmed.ru/uploads/files/2020-1/124367-mezhdunarodnyh_rekomendacijah_po_provedeniyu_mediko-biologicheskikh_issledovanij_s_isspolzovaniem_zhivotnyh_1985.pdf.

² Приказ Министерства здравоохранения и социального развития Российской Федерации от 23 августа 2010 года № 708н «Об утверждении Правил лабораторной практики» [Интернет]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/12079613/>.

Таблица 1. Биохимические показатели крови у стрессоустойчивых крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q1–Q3]**Table 1.** Blood biochemical parameters in stress-resistant rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q1–Q3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
11-ОКС, мкг/л 11-OX, $\mu\text{g/l}$	217,4 [214; 220]	2209 [2197; 2216]	0,011	2180 [2157; 2200]	0,041
Глюкоза, ммоль/л Glucose, mmol/l	5,1 [4,9; 5,3]	7,7 [7,2; 7,8]	0,019	6,9 [6,7; 7,1]	0,011
С-реактивный белок, мг/л C-reactive protein, mg/l	20 [17,5; 20]	160 [157; 162]	0,019	170 [162; 170]	0,024
Суммарные сиаловые кислоты, ммоль/л Total sialic acids, mmol/l	26,65 [25,9; 27,4]	30,6 [30,5; 31]	0,024	29,7 [29,1; 30,4]	0,021

Примечание. Здесь и в табл. 2, 3: $^* p < 0,05$ при сравнении с контролем с использованием критерия Манна–Уитни; $^{**} p < 0,05$ при сравнении с 10-м днём вращающегося электрического поля (ВЭП) с использованием критерия Манна–Уитни.

Note. Here and in the Tables 2, 3: $^* p < 0.05$ compared to parameters in the control group using the Mann–Whitney test; $^{**} p < 0.05$ compared to the parameters on the 10th day of exposure to the rotating electric field (REF) using the Mann–Whitney test.

Таблица 2. Биохимические показатели крови у стрессоустойчивых крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q1–Q3]**Table 2.** Blood biochemical parameters in stress-unresistant rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q1–Q3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
11-ОКС, мкг/л 11-OX, $\mu\text{g/l}$	231,3 [225; 236]	2880 [2857; 2902]	0,016	2835 [2797; 2885]	0,041
Глюкоза, ммоль/л Glucose, mmol/l	5,7 [5,6; 5,8]	9,2 [8,8; 9,5]	0,011	8,4 [8,0; 8,6]	0,011
С-реактивный белок, мг/л C-reactive protein, mg/l	10 [10; 17,5]	230 [230; 237]	0,010	260 [257; 262]	0,024
Суммарные сиаловые кислоты, ммоль/л Total sialic acids, mmol/l	23,6 [23,4; 23,7]	29,4 [29,2; 29,5]	0,020	29 [28,5; 29,5]	0,021

Таблица 3. Биохимические показатели крови у стрессоамбивалентных крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q1–Q3]**Table 3.** Blood biochemical parameters in stress-ambivalent rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q1–Q3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
11-ОКС, мкг/л 11-OX, $\mu\text{g/l}$	214 [207; 221]	2195 [2182; 2203]	0,011	2107 [2071; 2130]	0,041
Глюкоза, ммоль/л Glucose, mmol/l	5,6 [5,5; 5,8]	8,55 [8,4; 8,7]	0,011	7,8 [7,7; 8,0]	0,011
С-реактивный белок, мг/л C-reactive protein, mg/l	15 [10; 20]	255 [247; 260]	0,012	260 [257; 262]	0,024
Суммарные сиаловые кислоты, ммоль/л Total sialic acids, mmol/l	23 [21,2; 24,1]	27,1 [27; 27,3]	0,021	28,4 [28,3; 28,5]	0,021

оставался высоким. Уровень глюкозы снизился по сравнению с 10-м днём ВЭП, но относительно группы контроля оставался высоким и составил в группе СУ 35% ($p=0,010$), у СН — 46% ($p=0,019$), у СА — 39% ($p=0,011$). Наблюдался рост уровня СРБ, который в группе животных СН составил 13% ($p=0,01$). В группах СУ и СА также отмечалась тенденция к росту, но изменения не были достоверными при сравнении показателя с 10-м днём воздействия ВЭП. На 20-й день стресса в сыворотке крови концентрация суммарных сиаловых кислот оставалась повышенной по отношению к контрольным значениям во всех группах животных, при этом данный показатель у животных СУ и СН не имел статистически значимых отличий в сравнении с 10-м днём.

Результаты статистического анализа

Статистический анализ методом ранговой корреляции Спирмена (табл. 4) продемонстрировал, что на 10-й день ВЭП у крыс с разной стрессоустойчивостью наблюдались корреляционные связи между концентрацией глюкозы и сиаловых кислот, а также СРБ и сиаловых кислот. Так, в группе животных СУ наблюдалась прямая сильная связь между уровнем глюкозы и сиаловых кислот, а в контроле

была отрицательно сильной. В этой же группе наблюдалась прямая связь средней силы между СРБ и сиаловыми кислотами, тогда как до воздействия связь была отрицательной. В группе животных СН между глюкозой и сиаловыми кислотами наблюдалась прямая связь средней силы, при этом до воздействия связь была отрицательной; между СРБ и сиаловыми кислотами наблюдали сильную связь. В группе СА корреляционная связь не была статистически значимой.

Статистический анализ методом ранговой корреляции Спирмена показал, что на 20-й день ВЭП ни один из коэффициентов корреляции не достигал статистической значимости. Не выявлено статистически значимых связей ни между значениями глюкозы и сиаловых кислот, ни между СРБ и сиаловыми кислотами.

На 10-й день влияния ВЭП в сыворотке крови всех животных наблюдался резкий рост активности гепатоспецифических ферментов (табл. 5–7). Так, активность аспаратаминотрансферазы у СУ крыс возросла по сравнению с контролем в 3,7 ($p=0,02$), у СН — в 5,4 ($p=0,03$), у СА — в 4 ($p=0,03$) раза. Активность аланинаминотрансферазы превышала контроль у СУ особей в 2,4 ($p=0,02$), у СН — в 2,0 ($p=0,02$), у СА — в 2,3 ($p=0,02$) раза. Щелочная

Таблица 4. Коэффициенты корреляции (r) лабораторных показателей на фоне влияния техногенного вращающегося электрического поля в крови крыс с разной стрессоустойчивостью, Ме [Q1–Q3]

Table 4. Correlation coefficients (r) for the associations between blood glucose, C-reactive protein and sialic acids under exposure to the rotating electric field in rats with different levels of resistance to stress, Me [Q1–Q3]

Показатель Parameter	СУ SR		СН SU		СА SA	
	Глюкоза/СК Glucose/SAc	СРБ/СК CRP	Глюкоза/СК Glucose/SAc	СРБ/СК CRP	Глюкоза/СК Glucose/SAc	СРБ/СК CRP
Контроль Control	-0,878 $p=0,001$	-0,685 $p=0,005$	-0,63 $p=0,005$	-0,68 $p=0,001$	0,6 $p=0,005$	0,4 $p=0,005$
ВЭП, 10-й день REF 10th day	0,749 $p=0,005$	0,662 $p=0,019$	0,667 $p=0,018$	0,760 $p=0,004$	0,444 $p=0,148$	0,472 $p=0,121$

Примечание. Группы животных: СУ — стрессоустойчивые; СН — стрессонеустойчивые; СА — стрессоамбивалентные. СК — сиаловые кислоты; СРБ — С-реактивный белок.

Note. Animal groups: SR — stress-resistant; SU — stress-unstable; SA - stress-ambivalent. SAc — sialic acids; CRP — C-reactive protein.

Таблица 5. Активность гепатоспецифических ферментов в крови стрессоустойчивых крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q1–Q3]

Table 5. Activity of hepatospecific enzymes in the blood of stress-resistant rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q1–Q3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
АСТ, ед/л AsAT, U/l	39,1 [38,5; 38,7]	145 [144; 147,5]	0,024	140 [138; 141,7]	0,041
АЛТ, ед/л AlAT, U/l	25,6 [25,3; 26,2]	63,6 [62,2; 64,6]	0,024	66,2 [65,5; 67]	0,011
ЩФ, ед/л Alkaline phosphatase, U/l	72,8 [68,8; 75,6]	113,3 [111; 116]	0,032	106,6 [105,2; 108,7]	0,024

Примечание. Здесь и в табл. 6, 7: АСТ — аспаратаминотрансфераза; АЛТ — аланинаминотрансфераза; ЩФ — щелочная фосфатаза.

Note. AST — aspartate aminotransferase; ALT — alanine aminotransferase; APh - alkaline phosphatase.

Таблица 6. Активность гепатоспецифических ферментов в крови стрессонеустойчивых крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q_1-Q_3]**Table 6.** Activity of hepatospecific enzymes in the blood of stress-unresistant rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q_1-Q_3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
АСТ, ед/л AsAT, U/l	39,2 [37,9; 39,6]	213,5 [210; 218]	0,031	182,5 [180; 189]	0,041
АЛТ, ед/л AlAT, U/l	25 [23,6; 26,2]	52,7 [49,8; 69]	0,021	61,9 [58; 64,6]	0,011
ЩФ, ед/л Alkaline phosphatase, U/l	71,3 [68,8; 74,7]	201,5 [192; 208,7]	0,02	185 [181; 185]	0,024

Таблица 7. Активность гепатоспецифических ферментов в крови стрессоамбивалентных крыс ($n=6$) на фоне техногенного вращающегося электрического поля, Ме [Q_1-Q_3]**Table 7.** Activity of hepatospecific enzymes in the blood of stress-ambivalent rats ($n=6$) under exposure to the rotating electric field, Me [Q_1-Q_3]

Показатель Parameter	Контроль Non-exposed	Воздействие ВЭП 10 дней Exposed to REF for 10 days	p^*	Воздействие ВЭП 20 дней Exposed to REF for 20 days	p^{**}
АСТ, ед/л AsAT, U/l	39,3 [38,5; 39,9]	160 [153; 166,2]	0,030	150 [143,7; 155]	0,041
АЛТ, ед/л AlAT, U/l	26,5 [25,9; 26,8]	61,5 [60,4; 62,4]	0,021	65 [64,3; 65,8]	0,011
ЩФ, ед/л Alkaline phosphatase, U/l	70,3 [67,4; 73]	122,7 [118; 125,1]	0,030	114,5 [113,2; 116,5]	0,024

фосфатаза повысилась к уровню контроля в 1,5 ($p=0,03$), 2,8 ($p=0,02$) и 1,7 ($p=0,03$) раза соответственно.

На 20-й день стресса все исследуемые ферменты оставались достоверно повышенными относительно контрольных значений.

Описанные изменения в активности ферментов — маркеров поражения печени — свидетельствуют об активно протекающих процессах повреждения гепатоцитов [22]. Данные результаты согласуются с ранее опубликованными нами морфогистологическими исследованиями макропрепаратов печени при действии ВЭП [23].

ОБСУЖДЕНИЕ

Существуют убедительные доказательства, что воздействие стресса, различное по продолжительности и силе, способно вызывать и приводить к изменениям метаболического характера, а именно нарушению углеводного метаболизма. Можно наблюдать корреляционную связь между стрессорным воздействием и ростом концентрации глюкозы с дальнейшим переходом в сахарный диабет [4, 13].

К формированию механизмов, лежащих в основе метаболических эффектов стресса, причастны глюкокортикоиды, уровень которых существенно возрастает при стрессовых воздействиях. Ряд авторов считает [24], что глюкокортикоиды, помимо изменения синаптической пластичности при стрессе, способствуют изменению активности ферментов углеводного метаболизма в мозге и снижению чувствительности рецепторов к инсулину в центральной нервной системе. Вероятно, также одной

из причин метаболических изменений при стрессе является вовлечение органов, обеспечивающих глюконеогенез. Глюконеогенез имеет решающее значение для гомеостаза глюкозы, особенно во время стрессовых состояний и голодания. Глюконеогенез — это метаболический путь, направленный на синтез глюкозы из негексозных предшественников, основным субстратом для которого является лактат. Этот процесс регулируется уровнем инсулина и клеточной глюкозы, а также гормонами стресса [4, 16]. Всё большее признание получает вклад почек в системный глюконеогенез. Общеизвестное нарушение деятельности ренин-ангиотензинового вектора на фоне стресса приводит к разбалансировке функций ведущих ферментов метаболизма глюкозы, гипосенсибилизации инсулиновых рецепторов в центральной нервной системе и вовлечению нейропептидов (например, гипоталамического орексина) в процессе адаптации [1, 4, 13].

Проявлению адаптивного ответа способствуют многие органы и ткани с участием промежуточных метаболитов печени [1, 25, 26]. С начала воспалительного процесса различного проявления и локализации в печени изменяется скорость синтетических процессов, вследствие чего меняется состав и количество определённых разновидностей протеинов в крови [16, 20, 21]. Наши результаты свидетельствуют об активации печёночных трансаминаз, которые участвуют в процессах катаболизма аминокислот с целью их использования для образования углеводов [22].

Согласно литературным источникам, экспериментально индуцированный стресс связан со скачком маркеров воспаления, включая СРБ. Повреждение ткани вызывает биологический ответ в виде воспалительной реакции.

Воспаление представляет собой защитную реакцию соединительной ткани и неспецифический ответ на различные повреждающие стимулы. Воспаление проявляется острофазной реакцией — рядом местных и системных клинических, биохимических, сосудистых и клеточных изменений [14, 15].

Повышение уровня сиаловых кислот крови (сиалогликопротеинов) можно интерпретировать как адаптивный механизм организма на воспалительную реакцию. Продукты распада клеток и тканей оказывают мощное многофакторное воздействие на печень [16, 19]. По-видимому, повышение концентрации сиаловых кислот и СРБ служит проявлением реакции печени на это воздействие.

С помощью корреляционного анализа, а именно расчёта коэффициента ранговой корреляции Спирмена, нами проанализирована связь уровня сиаловой кислоты с глюкозой и СРБ. Показано, что ВЭП изменял коэффициент корреляции по сравнению с контролем. Так, сильная прямая связь наблюдалась между СРБ и сиаловыми кислотами в группе животных СН и сильная прямая связь между глюкозой и сиаловыми кислотами в группе СУ: в обоих случаях направленность связи была положительная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, влияние техногенного ВЭП вызывало метаболические изменения в крови у экспериментальных животных. На 10-й день действия техногенного поля в крови всех животных отмечался рост исследуемых показателей — 11-ОКС, глюкозы и СРБ, при этом наибольшие изменения наблюдались в группе стрессонеустойчивых животных. Возрастала активность всех гепатоспецифических ферментов: наибольшую активность аспартатаминотрансферазы и щелочной фосфатазы наблюдали

в группе стрессонеустойчивых животных, тогда как высокую активность аланинаминотрансферазы — в группе стрессоустойчивых особей. На 20-й день все исследуемые показатели во всех группах оставались повышенными по сравнению с контролем.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Вклад авторов. Авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией). Наибольший вклад распределён следующим образом: Т.С. Воронцова — концепция, получение и анализ данных, статистическая обработка результатов, интерпретация данных, подготовка окончательного варианта статьи; Н.Н. Васильева — анализ и интерпретация данных; Л.С. Исакова — концепция и дизайн исследования, окончательное утверждение присланной в редакцию рукописи.

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. No external funding.

Competing interests. The authors declare no conflicts of interest.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, data acquisition, data analysis, interpretation of results, drafting and revising the manuscript, approval of the final version. T.S. Vorontsova – concept and design, data acquisition, statistical analysis, data interpretation, drafting the article; N.N. Vasilyeva — data analysis, data interpretation; L.S. Isakova — concept and design of the study, final approval of the manuscript.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юмашев А.В. Триггерная концепция стресса: роль стресса в этиологии и патогенезе психосоматических нарушений // Азимут научных исследований: педагогика и психология. 2018. Т. 7, № 2. С. 441–445. EDN: XULHRZ
2. Юматов Е.А. Диалектика эмоционального стресса // Вестник международной академии наук. 2020. № 1. С. 31–35. EDN: BNOURU
3. Doeselaar L., Yang H., Bordes J., et al. Chronic social defeat stress in female mice leads to sex-specific behavioral and neuroendocrine effects // Stress. 2021. Vol. 24, N 2. P. 168–180. EDN: KYOOYV doi: 10.1080/10253890.2020.1864319
4. Абрамова А.Ю., Перцов А.С., Коплик Е.В., Перцов С.С. Влияние экспериментального хронического стресса на состояние углеводного обмена у крыс с разными характеристиками поведения // Бюллетень медицинской науки. 2018. № 1. С. 21–25. EDN: XPHUNZ
5. Аманбаева Г.М. Исследование влияния электромагнитного излучения на живой организм // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 13. С. 19–22. EDN: SMRFED
6. Баймухаметов Ф.З., Сайтов В.Р., Сальникова М.М., и др. Воздействие гармонических синусоидальных электромагнитных волн на гепатоциты крыс: ультраструктурный аспект // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2022. № 4. С. 90–97. EDN: OHSSTF doi: 10.53083/1996-4277-2022-210-4-90-97
7. Рябов Ю.Г., Ломаев Г.В., Репин А.А. Нормализация безопасных и комфортных условий в помещениях жилых и общественных зданий по факторам электроснабжения // Технологии электромагнитной совместимости. 2019. № 4. С. 72–83. EDN: ONIGWN
8. Kasprzyk A., Kanclerz G., Rokita E., Taton G. Which sources of electromagnetic field are of the highest for electrosensitive individuals? Questionnaire study with a literature review // Electromagn Biol Med. 2021. Vol. 40, N 1. P. 33–40. doi: 10.1080/15368378.2020.1839489
9. Пермяков А.А., Исакова Л.С., Мохова Л.Я., Филимонов А.М. Факторный анализ поведенческих моделей у экспериментальных животных с различной стресс-реактивностью //

- Вестник современной клинической медицины. 2019. Т. 12, № 4. С. 106–109. EDN: KKNCFE
doi: 10.20969/VSKM.2019.12(4).106-109
10. Патент РФ на изобретение № RU 166292 U1/МПК А61В 5/00(2006.01). Егоркина С.Б., Зайнаева Т.П., Гуцин А.В. Устройство для исследования влияния вращающегося электрического поля на биологические объекты. Владелец патента: ФГБОУ ВО «Ижевская государственная медицинская академия» Минздрава России. Режим доступа: https://yandex.ru/patents/doc/RU166292U1_20161120. Дата обращения: 15.10.2023.
 11. Резников А.Г. Методы определения гормонов: справочное пособие. Киев: Наукова думка, 1980. 400 с.
 12. Холматова К.К., Гржибовский А.М. Применение экологических исследований в медицине и общественном здравоохранении // Экология человека. 2016. Т. 23, № 9. С. 57–64. EDN: WKFTPN doi: 10.33396/1728-0869-2016-9-57-64
 13. Абрамова А.Ю., Коплик Е.В., Алексеева И.В., Перцов С.С. Уровень глюкозы в крови крыс с разной поведенческой активностью в динамике многократных стрессорных воздействий // Российский медико-биологический вестник имени академика И.П. Павлова. 2019. Т. 27, № 1. С. 10–19. EDN: OMWZHD doi: 10.23888/PAVLOVJ201927110-19
 14. Абдрахманова А.И., Амиров Н.Б., Цибулькин Н.А. С-реактивный белок при остром коронарном синдроме (обзор литературы) // Лечебное дело. 2020. № 4. С. 83–85. EDN: IRGKFN doi: 10.24412/2071-5315-2020-1227
 15. Деревцова А.А., Махкамов С.А., Кавыев А.А. Диагностическое значение С-реактивного белка для профилактики антибиотикорезистентности // Образование и право. 2021. № 10. С. 457–460. EDN: YCOKGB
doi: 10.24412/2076-1503-2021-457-460
 16. Вольхина И.В., Бутолин Е.Г. Оксидативный стресс и изменения показателей обмена сиалогликоконъюгатов печени крыс с аллоксановым сахарным диабетом // Сахарный диабет. 2022. Т. 25, № 3. С. 249–255. EDN: BXIZZI
doi: 10.14341/DM12763
 17. Dots V., Wuhler M. N-glycome signatures in human plasma: Associations with physiology and major diseases // FEBS Lett. 2019. Vol. 593, N 21. P. 2966–2976. EDN: RGOXWR
doi: 10.1002/1873-3468.13598
 18. Dhar C., Sasmal A., Diaz S., et al. Are sialic acids in COVID-19 pathogenesis? // Glycobiology. 2021. Vol. 31, N 9. P. 1068–1071. doi: 10.1093/glycob/cwab063
 19. El-Sayed M.S., Badawy A.E., Abdelmoneim R.O. Relationship between serum sialic acid concentration and diabetic retinopathy in Egyptian patients with type 2 diabetes mellitus // Benha Med J. 2018. Vol. 35. P. 257–263. doi: 10.1515/CCLM.2006.037
 20. Ghosh S. Sialic acid and biology of life: An introduction // S. Ghosh. Sialic acid and sialoglycoconjugates in the biology of life, health and disease. 1st edition. 2020. P. 1–61. doi: 10.1016/B978-0-12-816126-5.00001-9
 21. Воронцова Т.С., Васильева Н.Н., Бутолин Е.Г., и др. Влияние вращающихся электрических полей на биополимеры печени: экспериментальное исследование // Экология человека. 2023. Т. 30, № 2. С. 111–120. EDN: HFIWUA
doi: 10.17816/humeco111558
 22. Домбровский В.О. Эффективность комплекса лекарственных препаратов при экспериментальной жировой дистрофии печени крыс // Ветеринарный врач. 2022. № 3. С. 41–45. EDN: VKEAIJ doi: 10.33632/1998-698X.2021_41_45
 23. Воронцова Т.С., Исакова Л.С., Васильев Ю.Г., Васильева Н.Н. Влияние техногенного вращающегося электрического поля (ВЭП) на строение печени у крыс // Морфология. 2020. Т. 157, № 2-3. С. 52. EDN: AECLSE
 24. Detka J., Kurek A., Basta-Kaim A., et al. Neuroendocrine link between stress, depression and diabetes // Pharmacol Rep. 2013. Vol. 65, N 6. P. 1591–1600. doi: 10.1016/s1734-1140(13)71520-2
 25. Sugama S., Kakinuma Y. Stress and brain immunity: Microglial homeostasis through hypothalamus-pituitary-adrenal gland axis and sympathetic nervous system // Brain Behav Immun Health. 2020. Vol. 7. P. 100111. doi: 10.1016/j.bbih.2020.100111
 26. Totty M.S., Warren N., Huddleston I., et al. Behavioral and brain mechanisms mediating conditioned flight behavior in rats // Sci Rep. 2021. Vol. 11, N 1. P. 8215. doi: 10.1038/s41598-021-87559-3

REFERENCES

1. Yumashev AV. Trigger concept of stress: the role of stress in etiology and pathogenesis of psychosomatic disorders. *Azimuth of scientific researches: Pedagogy and psychology*. 2018;7(2):441–445. EDN: XULHRZ
2. Yumatov EA. Dialectics of emotional stress. *Herald of the International academy of Sciences (Russian section)*. 2020;(1):31–35. EDN: BNOURU
3. Doeselaar L, Yang H, Bordes J, et al. Chronic social defeat stress in female mice leads to sex-specific behavioral and neuroendocrine effects. *Stress*. 2021;24(2):168–180. EDN: KYOOYV
doi: 10.1080/10253890.2020.1864319
4. Abramova AYu, Pertsov AS, Koplík EV, Pertsov SS. Influence of experimental chronic stress on the state of carbohydrate exchange in rats with different characteristics of behavior. *Bulletin of Medical Science*. 2018;(1):21–25. EDN: XPHUHZ
5. Amanbaeva GM. Study of the influence of electromagnetic radiation on a living organism. *Problems of modern science and education*. 2018;(13):19–22. (In Russ). EDN: SMRFED
6. Baimukhametov FZ, Saitov VR, Salnikova MM, et al. Effect of harmonic sinusoidal electromagnetic waves on rat hepatocytes: Ultrastructural aspect. *Bulletin of the Altai State Agrarian University*. 2022;(4):90–97. EDN: OHSSTF
doi: 10.53083/1996-4277-2022-210-4-90-97
7. Ryabov YuG, Lomaev GV, Repin AA. Normalization of safe and comfortable conditions in residential and public buildings based on electricity factors. *Technologies of electromagnetic compatibility*. 2019;(4):72–83. EDN: ONIGWN
8. Kacprzyk A, Kanclerz G, Rokita E, Taton G. Which sources of electromagnetic field are of the highest for electrosensitive individuals? Questionnaire study with a literature review. *Electromagn Biol Med*. 2021;40(1):33–40. doi: 10.1080/15368378.2020.1839489
9. Permyakov AA, Isakova LS, Mokhova LYa, Filimonov AM. Behavioral model factor analysis in experimental animals with different stress reactivity. *The bulletin of contemporary clinical medicine*. 2019;12(4):106–109. EDN: KKNCFE
doi: 10.20969/VSKM.2019.12(4).106-109

10. Patent RUS № RU 166292 U1/MPK A61B 5/00(2006.01). Egorkina SB, Zainaeva TP, Gushchin AV. Device for investigation of the effect of rotating electric field on biological objects. Patent Owner: Izhevsk State Medical Academy. (In Russ). Available from: https://yandex.ru/patents/doc/RU166292U1_20161120. Accessed: 15.10.2023.
11. Reznikov AG. *Methods of determination of hormones: Reference manual*. Kiev: Naukova Dumka; 1980. 400 c. (In Russ).
12. Kholmatova KK, Grzhibovsky AM. Applications of environmental research in medicine and public health. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2016;23(9):57–64. EDN: WKFTPN
doi: 10.33396/1728-0869-2016-9-57-64
13. Abramova AYu, Koplik EV, Alekseeva IV, Pertsov SS. Blood glucose level in rats with different behavioral activity in the dynamics of repeated stress exposures. *I.P. Pavlov Russian medical biological herald*. 2019;27(1):10–19. EDN: OMWZHD
doi: 10.23888/PAVLOVJ201927110-19
14. Abdrakhmanova AI, Amirov NB, Tsiulkin NA. C-reactive protein in acute coronary syndrome: Literature review. *Lechebnoe delo*. 2020;(4):83–85. EDN: IRGKFH
doi: 10.24412/2071-5315-2020-1227
15. Derevtsova AA, Makhkamov SA, Kavyev AA. Diagnostic value of C-reactive protein for prevention of antibiotic resistance. *Obrazovanie i pravo*. 2021;(10):457–460. EDN: YCOKGB
doi: 10.24412/2076-1503-2021-457-460
16. Volkhina IV, Butolin EG. Oxidative stress and changes in the metabolism of sialoglycoconjugants in the liver of rats with alloxan diabetes. *Diabetes mellitus*. 2022;25(3):249–255. EDN: BXIZI
doi: 10.14341/DM12763
17. Dots V, Wuhner M. N-glycome signatures in human plasma: Associations with physiology and major diseases. *FEBS Lett*. 2019;593(21):2966–2976. EDN: RGOXWR
doi: 10.1002/1873-3468.13598
18. Dhar C, Sasmal A, Diaz S, et al. Are sialic acids in COVID-19 pathogenesis? *Glycobiology*. 2021;31(9):1068–1071. doi:10.1093/glycob/cwab063
19. El-Sayed MS, Badawy AE, Abdelmoneim RO. Relationship between serum sialic acid concentration and diabetic retinopathy in Egyptian patients with type 2 diabetes mellitus. *Benha Med J*. 2018;(35):257–263. doi: 10.1515/CCLM.2006.037
20. Ghosh S. Sialic acid and biology of life: An introduction. In book: Ghosh S. *Sialic acid and sialoglycoconjugates in the biology of life, health and disease*. 1st edition. 2020. P. 1–61. doi: 10.1016/B978-0-12-816126-5.00001-9
21. Vorontsova TS, Vasilyeva NN, Butolin EG, et al. The effect of rotating electric fields on liver biopolymers: An experimental study. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2023;30(2):111–120. EDN: HFIWUA
doi: 10.17816/humeco111558
22. Dombrovsky VO. The effectiveness of diagnostic studies in experimental fatty degeneration of the liver of white rats. *Veterinarian*. 2022;(3):41–45. EDN: VKEAIJ
doi: 10.33632/1998-698X.2021_41_45
23. Vorontsova TS, Isakova LS, Vasiliev YuG, Vasilyeva NN. Influence of a technogenic rotating electric field on rat liver morphology. *Morphology*. 2020;157(2-3):52. EDN: AECLSE
24. Detka J, Kurek A, Basta-Kaim A, et al. Neuroendocrine link between stress, depression and diabetes. *Pharmacol Rep*. 2013;65(6):1591–1600. doi: 10.1016/s1734-1140(13)71520-2
25. Sugama S, Kakinuma Y. Stress and brain immunity: Microglial homeostasis through hypothalamus-pituitary-adrenal gland axis and sympathetic nervous system. *Brain Behav Immun Health*. 2020;(7):100111. doi: 10.1016/j.bbih.2020.100111
26. Totty MS, Warren N, Huddleston I, et al. Behavioral and brain mechanisms mediating conditioned flight behavior in rats. *Sci Rep*. 2021;11(1):8215. doi: 10.1038/s41598-021-87559-3

ОБ АВТОРАХ

* Воронцова Татьяна Сергеевна;

адрес: Россия, 426034, Ижевск, ул. Коммунаров, д. 281;
ORCID: 0009-0005-6343-8549;
eLibrary SPIN: 9263-3209;
e-mail: solnoshko@yandex.ru

Васильева Наталья Николаевна, д-р мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0001-7062-9988;
eLibrary SPIN: 3899-4753;
e-mail: doctornava@list.ru

Исакова Лариса Сергеевна, д-р мед. наук, профессор;

ORCID: 0000-0003-4780-8720;
eLibrary SPIN: 6669-6007;
e-mail: norm-phys_igma@mail.ru

AUTHORS' INFO

* Tatyana S. Vorontsova;

address: 281 Kommunarov street, 426034 Izhevsk, Russia;
ORCID: 0009-0005-6343-8549;
eLibrary SPIN: 9263-3209;
e-mail: solnoshko@yandex.ru

Natalia N. Vasilyeva, MD, Dr. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0001-7062-9988;
eLibrary SPIN: 3899-4753;
e-mail: doctornava@list.ru

Larisa S. Isakova, MD, Dr. Sci. (Medicine), Professor;

ORCID: 0000-0003-4780-8720;
eLibrary SPIN: 6669-6007;
e-mail: norm-phys_igma@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author