

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco111558>

Влияние вращающихся электрических полей на биополимеры печени: экспериментальное исследование

Т.С. Воронцова, Н.Н. Васильева, Е.Г. Бутолин, В.Г. Иванов, Л.С. Исакова

Ижевская государственная медицинская академия, Ижевск, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Введение. Как отмечал в своих работах Н. Selye, факторы различной этиологии способны действовать на человека и вызывать сложный комплексный ответ организма в виде стресс-реакции и, как следствие, разбалансированность регуляторных физиологических систем.

Цель. Изучить влияние техногенного вращающегося электрического поля (ВЭП) на содержание углеводсодержащих биополимеров печени у экспериментальных животных.

Материал и методы. Эксперименты проведены на 54 крысах-самцах. В гомогенате печени определяли уровень сиаловых кислот, мукопротеинов, фукозы и α -L-фукозидазы до воздействия ВЭП, на 10-й и 20-й день после воздействия. До исследования животных диагностировали по методике «открытого поля» для определения стресс-устойчивости и разделили на группы: стресс-устойчивые, стресс-неустойчивые и амбивалентные.

Результаты. На 10-й день воздействия ВЭП в гомогенате печени у крыс отмечено повышение всех исследуемых показателей, что характерно для катаболических процессов: концентрация сиаловых кислот стала выше контрольных значений у стресс-устойчивых крыс на 14% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — на 29% ($p=0,020$) и у стресс-амбивалентных — на 26% ($p=0,021$). Прирост значений фукозы отмечен у стресс-устойчивых особей на 24% ($p=0,019$), у стресс-неустойчивых — на 27% ($p=0,019$), у стресс-амбивалентных — на 31% ($p=0,019$). Установлено повышение активности α -L-фукозидазы у стресс-устойчивых на 55% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — на 63% ($p=0,024$), у стресс-амбивалентных — на 55% ($p=0,011$). Концентрация мукопротеинов повысилась у стресс-устойчивых крыс на 58% ($p=0,011$), у стресс-неустойчивых — на 76% ($p=0,011$), у стресс-амбивалентных — на 65% ($p=0,021$). Наиболее выраженные катаболические процессы наблюдались в группе стресс-неустойчивых особей.

К 20-му дню эксперимента выраженность процессов распада углеводсодержащих биополимеров стала ниже во всех группах. При сравнении с 10-м днём концентрация сиаловых кислот снизилась у стресс-устойчивых крыс на 12% ($p=0,041$), стресс-неустойчивых — на 17% ($p=0,021$), у стресс-амбивалентных — на 20% ($p=0,011$). Отмечено также снижение концентрации мукопротеинов у стресс-устойчивых на 26% ($p=0,011$), у стресс-неустойчивых — на 33% ($p=0,024$), у стресс-амбивалентных — на 32% ($p=0,024$). Концентрация фукозы стала выше у стресс-устойчивых на 34% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — на 22% ($p=0,024$), у стресс-амбивалентных — на 28% ($p=0,010$). Параллельно активность α -L-фукозидазы стала выше во всех группах: у стресс-устойчивых — на 15% ($p=0,021$), у стресс-неустойчивых — на 46% ($p=0,020$), у стресс-амбивалентных — на 31% ($p=0,011$).

Заключение. Техногенное ВЭП изменяет содержание углеводсодержащих биополимеров в печени животных, способствуя активации катаболических процессов.

Ключевые слова: вращающееся электрическое поле; стресс; стресс-устойчивость; углеводсодержащие биополимеры печени; сиаловые кислоты; мукопротеины; фукоза; α -L-фукозидаза.

Как цитировать:

Воронцова Т.С., Васильева Н.Н., Бутолин Е.Г., Иванов В.Г., Исакова Л.С. Влияние вращающихся электрических полей на биополимеры печени: экспериментальное исследование // Экология человека. 2023. Т. 30, № 2. С. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco111558>

DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco111558>

Effects of rotating electric fields on liver biopolymers: an experimental study

Tatyana S. Vorontsova, Natalia N. Vasileva, Evgeny G. Butolin, Vadim G. Ivanov, Larisa S. Isakova

Izhevsk State Medical Academy, Izhevsk, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: According to the classic works of H. Selye, a variety of factors can impact humans and trigger a complex bodily response known as a stress reaction. This can lead to an imbalance in the body's regulatory physiological systems.

AIM: To investigate the effects of a technogenic rotating electric field (REF) on the levels of carbohydrate-containing liver biopolymers in experimental animals.

MATERIAL AND METHODS: A total of 54 rats were used in the experiment. The levels of sialic acids, mucoproteins, fucose, and α -L-fucosidase were measured in the liver homogenate before the study, on the 10th and 20th day of the experiment. To ensure accurate results, the rats were first diagnosed using the open field method to determine their stress resistance levels. Based on the results, the rats were then divided into three groups: stress-resistant, stress-unstable, and ambivalent.

RESULTS: By the 10th day of REF exposure, an increase in all the studied parameters in the liver homogenate in rats was observed indicating catabolic processes. Sialic acids concentration in stress-resistant, unstable and ambivalent rats increased by 14% ($p=0.024$), 29% ($p=0.020$) and 26% ($p=0.021$), respectively. Corresponding elevations of fucose concentration were 24% ($p=0.019$), 27% ($p=0.019$), 31% ($p=0.019$) while the activity of α -L-fucosidase increased by 55% ($p=0.024$), in 63% ($p=0.024$) and 55% ($p=0.011$) in the abovementioned categories of rates. Mucoproteins concentrations increased by 58% ($p=0.011$) in stress-resistant, 76% ($p=0.011$) in stress-unstable and 65% ($p=0.021$) in stress-ambivalent rats. By the 20th day of the experiment, decomposition of carbohydrate-containing biopolymers slowed in all groups. When compared with the 10th day 10, sialic acids concentration decreased in stress resistant, unstable and ambivalent rats by 12% ($p=0.041$), 17% ($p=0.021$) and 20% ($p=0.011$), respectively. Corresponding decrease in of mucoproteins was 26% ($p=0.011$), 33% ($p=0.024$), and 32% ($p=0.024$). Fucose concentration increased by 34% ($p=0.024$) in stress-resistant, by 22% ($p=0.024$) in stress-unstable and by 28% ($p=0.010$) in stress-ambivalent rats. Correspondingly, α -L-fucosidase activity increased by 15% ($p=0.021$), 46% ($p=0.02$) and 31% ($p=0.011$).

CONCLUSION: The study's findings indicate that technogenic REF can alter the levels of carbohydrate-containing biopolymers in animal livers, leading to the activation of catabolic processes. The group of stress-unstable individuals exhibited the most significant catabolic processes. Our results may have implications for occupations exposures to REF.

Keywords: rotating electric field; stress; stress resistance; carbohydrate-containing liver biopolymers; sialic acids; mucoproteins; fucose; α -L-fucosidase.

To cite this article:

Vorontsova TS, Vasileva NN, Butolin EG, Ivanov VG, Isakova LS. Effects of rotating electric fields on liver biopolymers: an experimental study. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2023;30(2):129–138. DOI: <https://doi.org/10.17816/humeco111558>

ОБОСНОВАНИЕ

Современный уровень цивилизации неразрывно связан с техническим прогрессом, а именно внедрением различных источников электромагнитного поля в жизнедеятельность человека. Многопрофильное и многофункциональное использование источников электромагнитного излучения повышает уровень интенсивности их воздействия на человека и биосферу в целом.

Как отмечал в своих работах Н. Selye, факторы различной этиологии способны воздействовать на человека и вызывать сложный комплексный ответ организма в виде стресс-реакции и, как следствие, разбалансированность регуляторных физиологических систем [1, 2]. По современным представлениям, способность организма противостоять повреждениям в условиях стресса определяется продолжительностью и силой стрессорного стимула, особенностями стресс-лимитирующих и стресс-реализующих систем индивида. Известно, что в условиях стресса животные дифференцируются на устойчивых и подверженных различным нарушениям физиологических функций [3, 4].

С внедрением современных технологий рождаются иные физические воздействия стрессогенной природы, такие как техногенное вращающееся электрическое поле (ВЭП). Установлено, что ВЭП представляют потенциальную угрозу для организма человека, так как могут составлять более 80% всех электромагнитных излучений, которые характеризуются высоким уровнем биологической активности. Данные поля генерируются между разнесёнными в пространстве электроисточниками, которые пребывают под напряжением и сдвинуты электрически по фазе. Специфика воздействия определяется не степенью поглощения энергии, а энергетической насыщенностью объекта и его структурной организацией. Именно это является причиной проявления действия ВЭП даже при минимальных значениях энергии [5]. На сегодняшний день последствия его влияния на биологические объекты изучены недостаточно. В научной литературе есть данные о том, что онкологическая патология в 13 раз чаще встречается у электромонтёров, напрямую взаимодействующих с трёхфазными источниками обеспечения (индукций 60 Гц), чем у рабочих, находящихся под воздействием только полей индукций токов от однофазного оборудования [6].

Природа «лишила» человека органов чувств, которые способны воспринимать электромагнитное излучение. Именно поэтому идентифицировать данный стрессор как особо опасный невозможно [7]. Ввиду сложности изучения воздействия этих полей на организм человека актуальными становятся экспериментальные исследования с привлечением животных. Наиболее приемлемой моделью для таких целей можно считать животных из семейства грызунов (крысы, мыши): многочисленное потомство, короткий период беременности, относительно дешёвое

содержание и разведение. Эксперименты на животных разрешены при соблюдении принципов гуманного обращения с ними, этических норм и рекомендаций, изложенных в Европейской конвенции о защите позвоночных животных, используемых для экспериментов или в иных научных целях, а также в ГОСТ Р-53434-2009 «Принципы надлежащей лабораторной практики».

Согласно исследованиям Национального института США в 2002 году, геном человека насчитывает 35 000 генов и совпадает с геномом мыши на 70%, а крысы — на 90%. Соответственно, учитывая данные о сходстве генома, протекающих процессах и механизмах, мы можем экстраполировать результаты, полученные в ходе эксперимента, на человека.

Как известно, печень занимает центральное место в обмене веществ и регулировании процессов гомеостаза в организме. Именно поэтому серьёзное нарушение её функций приводит к сдвигам физиологических процессов во всём организме, и наоборот, изменение функционального состояния этого органа координирует и определяет метаболизм. Нарушения со стороны регуляторных систем (нервной, эндокринной и иммунной) запускают резервно-приспособительные механизмы адаптации на уровне печени, приводящие к её структурно-функциональным изменениям [8, 9]. Причиной функциональных органических расстройств при стрессе, возможно, является сдвиг в метаболизме углеводсодержащих биополимеров, которые определяют полиморфизм, контролируют дифференцировку клеток, принимают участие в регенерации тканей, осуществляют опорную и структуроформирующую функции [10–12].

Цель работы — изучить влияние техногенного вращающегося электрического поля на содержание углеводсодержащих биополимеров печени у экспериментальных животных.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Эксперименты проведены на 54 половозрелых белых беспородных крысах-самцах массой 180–220 г. Животных содержали в виварии в стандартных условиях, со свободным доступом к воде и пище. При выполнении исследования руководствовались биоэтическими принципами, изложенными в «Международных рекомендациях (этический кодекс) по проведению медико-биологических исследований с использованием животных» (1985). На проведение эксперимента получено разрешение локального этического комитета Ижевской государственной медицинской академии (протокол № 607 от 22.05.2018).

До эксперимента крыс исследовали по методике «открытого поля» (арена круглой формы диаметром 90 см, поделенная на 19 центральных и 18 периферических сегментов, по периметру имеющая стенки высотой 40 см, над ареной — лампу для освещения мощностью 100 Вт). На основании поведения животных в «открытом поле»

определяли коэффициент стресс-устойчивости [13] с использованием компьютерной программы RatTest (Россия) [14]. Так, сумму пересечённых периферических и центральных сегментов делили на сумму латентных периодов первого движения и выхода в центр поля. Далее крысы были разделены на три группы по коэффициенту устойчивости $K_{уст}$: стресс-устойчивые ($K_{уст}=2,0-5,0$), стресс-неустойчивые ($K_{уст}=0,30-0,70$) и амбивалентные ($K_{уст}=0,80-1,99$).

Крыс подвергали влиянию ВЭП (патент на полезную модель № 166292 «Устройство для исследования влияния ВЭП на биологические объекты»). ВЭП-установка представляет собой физическую модель линии электропередачи (трансформатор, электроды, конденсатор, резистор). Напряжение между электродами использовали в качестве опорного напряжения. Относительно этого опорного напряжения при помощи фазосдвигающей цепочки, образованной последовательно соединённым 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 с амплитудными значениями напряженности 30,5 и 75,9 В/м соответственно. Поля изменялись по синусоидальному закону с частотой 50 Гц. Электропитание — от сети переменного тока (220 В). Внутри ВЭП-оборудования находилось пространство (относительно центра установки), ограниченное по осям X, Y, Z, где отмечена наибольшая однородность напряженности электрического поля.

Проведено 2 серии экспериментов продолжительностью 10 ($n=18$) и 20 дней ($n=18$), во время которых животных помещали внутрь установки ежедневно в первой половине дня на 60 мин. Контролем служили крысы ($n=18$), которых помещали в установку без включения её в сеть.

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

Печёночную ткань для приготовления гомогената брали из центральной дольки печени. Гомогенат изготавливали, используя фосфатный буфер (pH=7,45) и механический гомогенизатор Поттера (тефлон-стекло), далее гомогенат был отцентрифугирован в течение 10 мин при 1000 g. Фотометрически определяли уровень сиаловых кислот с помощью набора реагентов «СиалоТест» (НПЦ «Эко-Сервис», Россия), мукопротеинов — с использованием набора реагентов («Хоспитекс Диагностикс», Россия), фукозы — с применением набора реагентов (Panreac LifeSciences, Испания) и активность α -L-фукозидазы (набор реагентов производства DIRUI, Китай) до начала опыта, на 10-й и 20-й день опыта. Все образцы выполнены в соответствии с протоколом производителя.

Статистическая обработка результатов. Для статистического исследования использовали программы Statistica 10.0, Microsoft Excel 2007. Для проверки

на нормальность распределения величин применяли графический статистический метод оценки Шапиро–Уилка, для определения статистической значимости различий между группами — непараметрический двусторонний критерий Манна–Уитни. С целью определения статистической значимости различий между несколькими независимыми группами использовали критерий Краскела–Уоллиса. Результаты представлены в виде медианы, межквартильных интервалов (25-й, 75-й процентиля) — Me [Q1; Q3]. Различия между группами признавали статистически значимыми при $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На 10-й день воздействия ВЭП (табл. 1–3) в гомогенате печени крыс всех групп наблюдалось повышение содержания терминальных углеводов в составе гликопротеинов — сиаловых кислот и фукозы. У стресс-устойчивых крыс уровень сиаловых кислот (рис. 1) стал выше, что составило 14% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — 29% ($p=0,020$), у стресс-амбивалентных — 26% ($p=0,021$). Повышение концентрации сиаловых кислот в гомогенате печени животных при действии ВЭП можно интерпретировать как усиление процессов катаболизма углеводсодержащих биополимеров. Содержание фукозы (рис. 2) в большей степени было выше у стресс-неустойчивых и стресс-амбивалентных животных (на 27 и 31% соответственно, $p=0,019$), у стресс-устойчивых особей рост данного показателя составил 24% ($p=0,019$). Активность α -L-фукозидазы (рис. 3) также повысилась, что говорит о нарастающем катаболизме фукозогликопротеинов. Так, у стресс-устойчивых особей повышение активности фермента составило 55% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — 63% ($p=0,024$), у стресс-амбивалентных — 55% ($p=0,011$). Концентрация мукопротеинов (рис. 4) увеличилась во всех группах крыс: у стресс-устойчивых — на 58% ($p=0,011$), у стресс-неустойчивых — на 76% ($p=0,011$), у стресс-амбивалентных — на 65% ($p=0,021$).

На 20-й день стресса в гомогенате печени крыс, при сравнении с 10-м днём, концентрация сиаловых кислот во всех группах стала ниже: у стресс-устойчивых — на 12% ($p=0,041$), стресс-неустойчивых — на 17% ($p=0,021$), стресс-амбивалентных — на 20% ($p=0,011$). Содержание мукопротеинов также снизилось: у стресс-устойчивых — на 26% ($p=0,011$), стресс-неустойчивых — на 33% ($p=0,024$), стресс-амбивалентных — на 32% ($p=0,024$). Концентрация фукозы, при сравнении с 10-м днём, повысилась у стресс-устойчивых на 34% ($p=0,024$), у стресс-неустойчивых — на 22% ($p=0,024$), у стресс-амбивалентных — на 28% ($p=0,010$). Произошло также повышение активности α -L-фукозидазы во всех группах: у стресс-устойчивых — на 15% ($p=0,021$), у стресс-неустойчивых — на 46% ($p=0,02$), у стресс-амбивалентных — на 31% ($p=0,011$).

Таблица 1. Компоненты углеводсодержащих биополимеров и α -L-фукозидаза в гомогенате печени у стресс-устойчивых крыс ($n=6$) при действии вращающегося электрического поля**Table 1.** Components of carbohydrate-containing biopolymers and α -L-fucosidase in the liver homogenate in stress-resistant rats ($n=6$) under the action of rotating electric field

Показатель Parameter	Контроль Control	Воздействие вращающегося электрического поля 10 дней Action of rotating electric field during 10 days	<i>p</i>	Воздействие вращающегося электрического поля 20 дней Action of rotating electric field during 20 days	<i>p</i>
Сиаловые кислоты, мкмоль/л Sialic acids, $\mu\text{mol/l}$	15,87 [15,7; 15,9]	18,4 [18,2; 18,5]	0,024	16,3 [16,2; 16,3]	0,041
Мукопротеины, мкЕд/мг Mucoproteins, $\mu\text{U/mg}$	1410 [1409; 1411]	2225 [2220; 2235]	0,011	1641,0 [1640,0; 1643,5]	0,011
Фукоза, мг/кг Fucosa, mg/kg	670,0 [667,5; 671,0]	832,5 [830,0; 839,0]	0,019	1112 [1111; 1112]	0,024
α -L-фукозидаза, Ед/г α -L-fucosidase, U/g	1350,0 [1349,5; 1353,0]	2094 [2091; 2096]	0,024	2400 [2390; 2408]	0,021

Таблица 2. Компоненты углеводсодержащих биополимеров и α -L-фукозидаза в гомогенате печени у стресс-неустойчивых крыс ($n=6$) при действии вращающегося электрического поля**Table 2.** Components of carbohydrate-containing biopolymers and α -L-fucosidase in the liver homogenate in stress-unstable rats ($n=6$) exposed to rotating electric field

Показатель Parameter	Контроль Control	Воздействие вращающегося электрического поля 10 дней Action of rotating electric field during 10 days	<i>p</i>	Воздействие вращающегося электрического поля 20 дней Action of rotating electric field during 20 days	<i>p</i>
Сиаловые кислоты, мкмоль/л Sialic acids, $\mu\text{mol/l}$	15,6 [15,5; 18,8]	20,2 [20,1; 20,2]	0,020	16,8 [16,2; 17,4]	0,021
Мукопротеины, мкЕд/мг Mucoproteins, $\mu\text{U/mg}$	1443 [1441; 1448]	2547,0 [2545,0; 2552,5]	0,011	1694,0 [1693,0; 1695,5]	0,024
Фукоза, мг/кг Fucosa, mg/kg	670,0 [667,5; 675,0]	921 [920; 923]	0,019	1127 [1124; 1135]	0,024
α -L-фукозидаза, Ед/г α -L-fucosidase, U/g	1380,0 [1376,5; 1386,0]	2251 [2250; 2256]	0,024	3279 [3273; 3283]	0,020

Таблица 3. Компоненты углеводсодержащих биополимеров и α -L-фукозидаза в гомогенате печени у стресс-амбивалентных крыс ($n=6$) при действии вращающегося электрического поля**Table 3.** Components of carbohydrate-containing biopolymers and α -L-fucosidase in the liver homogenate in stress-ambivalent rats ($n=6$) exposed to rotating electric field

Показатель Parameter	Контроль Control	Воздействие вращающегося электрического поля 10 дней Action of rotating electric field during 10 days	<i>p</i>	Воздействие вращающегося электрического поля 20 дней Action of rotating electric field during 20 days	<i>p</i>
Сиаловые кислоты, мкмоль/л Sialic acids, $\mu\text{mol/l}$	15,2 [15,0; 15,4]	19,1 [18,9; 19,4]	0,021	15,35 [15,10; 15,80]	0,011
Мукопротеины, мкЕд/мг Mucoproteins, $\mu\text{U/mg}$	1482 [1474; 1487]	2445 [2437; 2452]	0,021	1659 [1656; 1660]	0,024
Фукоза, мг/кг Fucosa, mg/kg	647,5 [644,0; 650,0]	845 [844; 846]	0,019	1085 [1085; 1089]	0,01
α -L-фукозидаза, Ед/г α -L-fucosidase, U/g	1316,5 [1307,0; 1326,0]	2045 [2040; 2050]	0,021	2670 [2667; 2672]	0,011

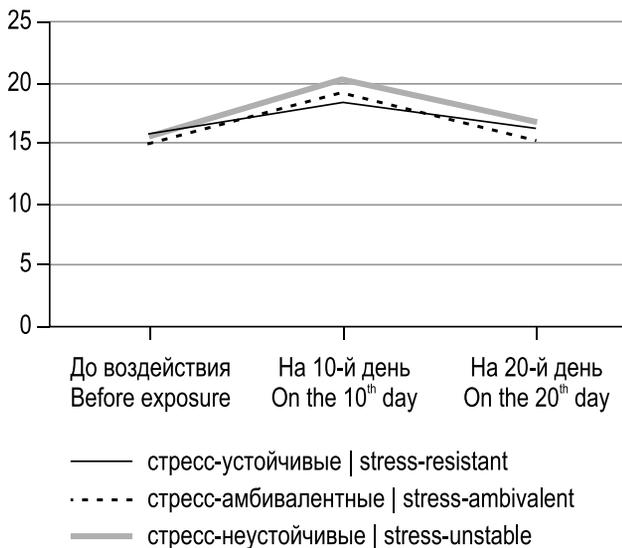


Рис. 1. Динамика концентрации сиаловых кислот в гомогенате печени крови у крыс на фоне влияния вращающегося электрического поля, $\mu\text{mol/l}$.

Fig. 1. Sialic acids concentration in rat liver homogenate by the duration of exposure to rotating electric field, $\mu\text{mol/l}$.

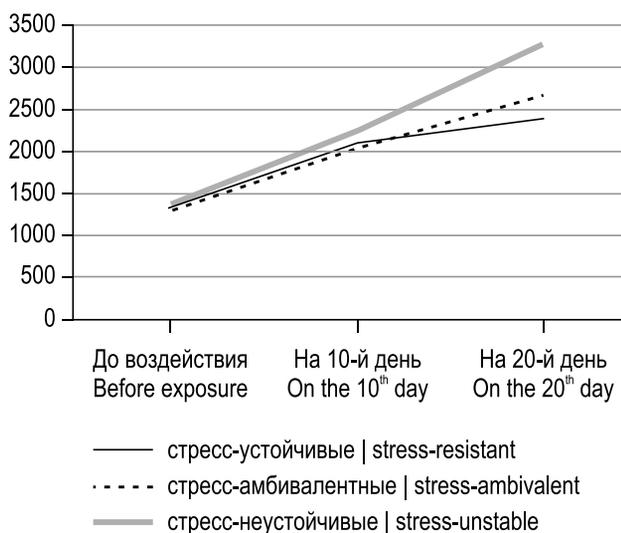


Рис. 3. Динамика содержания фукозидазы в гомогенате печени крови у крыс на фоне влияния вращающегося электрического поля, ЕД/г.

Fig. 3. Fucosidase level in rat liver homogenate by the duration of exposure to rotating electric field, U/g.

ОБСУЖДЕНИЕ

На сегодняшний день геомагнитный фон планеты состоит из существующего электромагнитного поля Земли и поля искусственного генеза, сформированного массовым применением электрической и электромагнитной энергии человечеством. Доказано, что искусственно модифицированный фон внешней среды создаёт нагрузку на живой организм человека, что активирует его адаптивные функции [5, 7]. С кратковременными стрессовыми воздействиями каждый индивид сталкивается постоянно

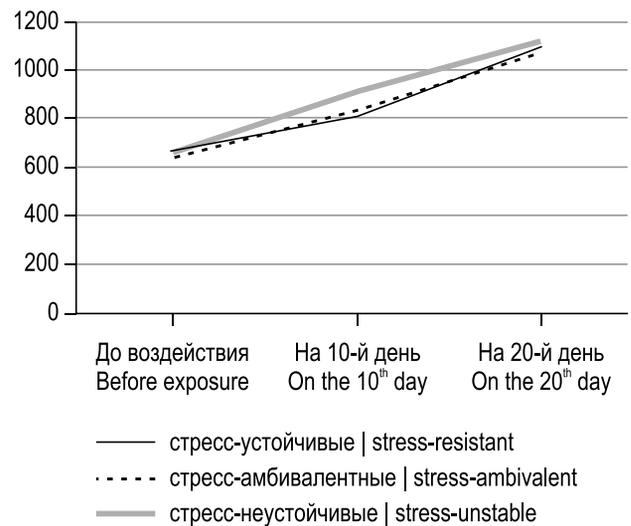


Рис. 2. Динамика содержания фукозы в гомогенате печени крови у крыс на фоне влияния вращающегося электрического поля, мг/кг.

Fig. 2. Fucosa concentration in rat liver homogenate by the duration of exposure to rotating electric field, mg/kg.

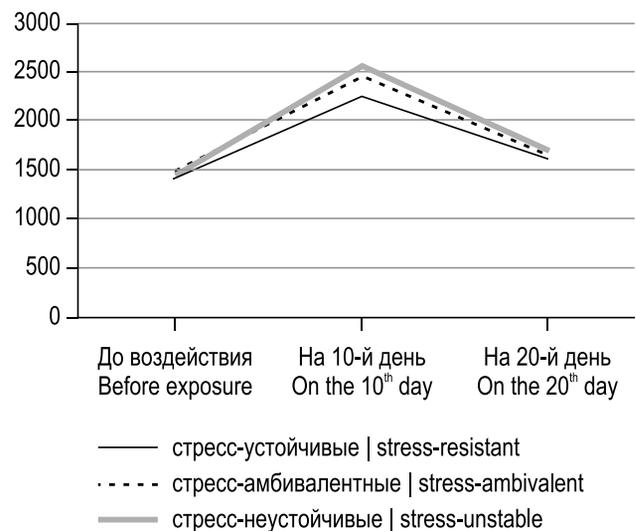


Рис. 4. Динамика содержания мукопротеинов в гомогенате печени крови у крыс на фоне влияния вращающегося электрического поля, мкЕд/кг.

Fig. 4. Mucoproteins concentration in rat liver homogenate by the duration of exposure to rotating electric field, $\mu\text{U/kg}$.

и ежедневно. Они имеют компенсаторно-адаптивный характер, так как активируют энергорезервы организма (поведенческие, вегетативно-соматические, метаболические и т.д.), а также содействуют повышению его резистентности к действию неблагоприятных факторов внешней среды [7, 15].

В отличие от кратковременного стресса, вызванного самыми разнообразными причинами (психоземotionalными, социальными, техногенными, экзогенными), хронический стресс приводит к дезинтеграции регуляторных

механизмов и к развитию того или иного патологического состояния. Гомеостатические константы, изменённые кратковременным стрессом, сравнительно быстро восстанавливаются. Нормализация этих показателей является следствием усиленной работы регуляторных механизмов, направленных на поддержание гомеостаза [15]. Длительное воздействие электромагнитного излучения как экзогенного стресс-фактора приводит к ускоренному истощению энергоресурсов организма, активации процессов клеточного апоптоза и необратимым деструктивным биологическим эффектам. В доступной литературе можно встретить довольно много исследований, посвящённых изучению влияния электромагнитного поля на организм человека (к примеру [5, 6]). При этом в отношении влияния техногенного ВЭП имеются единичные исследования, касающиеся гормональной и репродуктивной систем организма [4–6].

Таким образом, в настоящее время не вызывает сомнения факт, что ВЭП обладает выраженной биологической активностью на различные аспекты микроциркуляции, клеточный и стромальный компоненты органов с последующим изменением их функций.

Известно, что метаболизм углеводов содержащих биополимеров складывается из двух разнонаправленных процессов — анаболизма и катаболизма. На динамику изменения процессов синтеза указывает концентрация мукопротеинов, процессов распада — содержание сиаловых кислот и фукозы, а также α -L-фукозидазы [10, 11, 16].

Результаты нашего исследования демонстрируют, что техногенный стресс изменяет метаболизм углеводов содержащих биополимеров в печени, а именно преобладают процессы распада, и степень изменений зависит от прогностической устойчивости к стресс-воздействию. Так, на 10-й день влияния техногенного ВЭП мы наблюдали резкое возрастание концентрации терминальных углеводов в составе гликопротеинов — сиаловых кислот и фукозы [10, 11]. Высокий уровень суммарных сиаловых кислот в гомогенате печени животных при действии ВЭП можно интерпретировать как усиление катаболизма углеводов содержащих биополимеров. Параллельно наблюдалось накопление фукозы в ткани печени и повышенная активность α -L-фукозидазы, что может указывать на активацию воспалительных процессов. Известно, что фукозосодержащие гликопротеины являются составляющими комплексами острофазных и иммунных протеинов, поверхностных мембранных комплексов, трансформирующих трансмембранные сигналы в клетку [10–12].

Техногенный стресс физической этиологии, вызываемый ВЭП, не только специфически воздействует на организм, но и приводит к изменениям, свойственным классическому течению стресс-реакции, что является триггером гипоталамо-гипофизарно-надпочечникового вектора и продукции глюкокортикоидов, а также способствует выделению катехоламинов. Известно, что эти гормоны, являясь синергистами в регуляции углеводного обмена,

усиливают катаболические эффекты на метаболизм углеводов содержащих биополимеров путём активации аденилатциклазы [16, 17]. Состояние гиперкатехоламинемии, наблюдаемое при стрессе, также приводит к увеличению продукции печенью интерлейкина-6, который, по мнению ряда авторов, является индикатором защитных механизмов, таких как выработка печенью белков острой фазы [18].

Наши результаты согласуются с данными работ, в которых описана корреляция между уровнем 11-оксикортикостероидов, метаболизмом сиалогликопротеинов и биополимеров соединительной ткани. Авторы описывают катаболическое действие глюкокортикоидов на компоненты соединительной ткани [16, 17, 19].

Следует обратить внимание, что интенсивность катаболических процессов углеводов содержащих биополимеров ткани печени на 20-й день воздействия ВЭП заметно уменьшилась, а именно снизился уровень сиаловых кислот и мукопротеинов до цифр контроля в ткани печени во всех группах животных. Вероятно, это можно объяснить стадией адаптации к влиянию ВЭП и стабилизацией метаболизма углеводов содержащих биополимеров.

Известно, что в стрессовых условиях выявляются животные, устойчивые и предрасположенные к нарушению различных физиологических функций [20]. Действие ВЭП в наших исследованиях вызывало наиболее выраженные изменения у стресс-неустойчивых особей на 10-й день. В работе [21] описано, что чувствительность животных к эмоциональному стрессу определяется в первую очередь специфической организацией и нейромедиаторной интеграцией нейронов в гипоталамо-лимбико-ретикулярном комплексе. Он активируется при стресс-воздействии и запускает весь комплекс соматовегетативных проявлений. При этом механизмы реализации индивидуальной стресс-устойчивости формируются не только на уровне центральных регуляторов гомеостаза, но и на органном уровне. По-видимому, стресс-неустойчивые животные в меньшей степени способны выдерживать воздействие стрессорных факторов, что приводит к негативным последствиям стресса в функционировании и регуляции работы различных систем организма, в том числе в метаболизме углеводов содержащих биополимеров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное исследование демонстрирует, что вращающееся электрическое поле вызывает существенные изменения содержания углеводов содержащих биополимеров в печени животных, способствуя активации катаболических процессов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ/ ADDITIONAL INFORMATION

Вклад авторов: Т.С. Воронцова — концепция, получение и анализ данных, статистическая обработка результатов,

интерпретация данных, подготовка окончательного варианта статьи; Н.Н. Васильева — анализ данных, интерпретация данных; Е.Г. Бутолин и В.Г. Иванов — получение и анализ результатов биохимического исследования; Л.С. Исакова — концепция и дизайн исследования, окончательное утверждение присланной в редакцию рукописи. Все 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).

Authors' contribution: T.S. Vorontsova — study conception and design, data acquisition and analysis, interpretation of the findings, writing of the final version of the manuscript; N.N. Vasileva — data analysis, interpretation of the results; E.G. Butolin and V.G. Ivanov — obtaining and analyzing the results of biochemical research;

L.S. Isakova — study conception and design, approval of the final version of the manuscript. All authors confirm that their authorship complies with the international ICMJE criteria. All authors confirm that their authorship meets the ICMJE criteria. All authors have made a significant contribution to the conception and implementation of the study, writing of the manuscript and approved the final version prior to submission.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. Выполнялось за счёт аспиранта.

Funding sources. No external funding. All expenses were covered by the doctoral student.

Конфликт интересов. Авторы подтверждают отсутствие конфликта интересов.

Competing interests. The authors declare no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Салье Г. Очерки об адаптационном синдроме. Москва : Медгиз, 1960. 254 с.
2. Башкатова В.Г., Судаков С.К. Современные подходы к изучению генетически детерминированной устойчивости лабораторных животных к стрессорным нагрузкам (обзор) // Бюллетень медицинской науки. 2018. № 1. С. 34–37.
3. Эбзеева Е.Ю., Полякова О.А. Стресс и стресс-индуцированные расстройства // Медицинский совет. 2022. Т. 16, № 2. С. 127–133. doi: 10.21518/2079-701X-2022-16-2-127-133
4. Зайнаева Т.П., Егоркина С.Б. Влияние вращающегося электрического поля на систему «мать–плацента–плод» у крыс с разной прогностической стрессоустойчивостью // Экология человека. 2016. Т. 16, № 8. С. 3–7. doi: 10.33396/1728-0869-2016-8-3-7
5. Пряхин Е.А. Адаптивные реакции при воздействии факторов электромагнитной природы // Вестник Челябинского государственного педагогического университета. 2006. № 6. С. 136–145.
6. Рябов Ю.Г., Ломаев Г.В., Тюренков С.Н. Вращающееся электрическое поле — физический фактор, подлежащий санитарному контролю // Технологии электромагнитной совместимости. 2017. № 1. С. 38–45.
7. Аманбаева Г.М. Исследование влияния электромагнитного излучения на живой организм // Проблемы современной науки и образования. 2018. № 13. С. 19–22.
8. Mizrahi M., Adar T., Lalazar G., et al. Glycosphingolipids prevent APAP and HMG-CoA reductase inhibitors-mediated liver damage: a novel method for “safer drug” formulation that prevents drug-induced liver injury // J Clin Transl Heparol. 2018. Vol. 6, N 2. P. 127–134. doi: 10.14218/JCTH.2017.00071
9. 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.
10. Visser E.A., Moons S.J., Timmermans S.B.P.E., et al. Sialic acid O-acetylation: from biosynthesis to roles in health and disease // J Biol Chem. 2021. Vol. 297, N 2. P. 100906. doi: 10.1016/j.jbc.2021.100906
11. Watanabe Y., Watanabe S., Fukui Y., et al. Functional and structural characterization of a novel L-fucose mutarotase involved in non-phosphorylative pathway of L-fucose metabolism // Biochem Biophys Res Commun. 2020. Vol. 528, N 1. P. 21–27. doi: 10.1016/j.bbrc.2020.05.094
12. Jin X., Zhou R., Huang Y. Role of inflammasomes in HIV-1 infection and treatment // Trends Mol Med. 2022. Vol. 28, N 5. P. 421–434. doi: 10/1016/j.molmed.2022.02.010
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 им. И.П. Павлова. 2019. Т. 27, № 1. С. 10–19. doi: 10.23888/PAVLOVJ201927110-19
14. Пермяков А.А., Елисеева Е.В. Анализ поведенческих реакций у экспериментальных животных с различной стрессоустойчивостью / под ред. Л.С. Исаковой. Ижевск : КнигоГрад, 2017. doi: 10.23648/PRNT.2124
15. Судаков К.В., Умрюхин П.Е. Системные основы эмоционального стресса. Москва : ГЭОТАР-Медиа, 209. 105 с.
16. Вольхина И.В. Изменение содержания сиаловых кислот в плазме крови крыс при стрессовых воздействиях // Медицина: теория и практика. 2019. Т. 4. С. 144.
17. Вольхина И.В., Бутолин Е.Г. Оксидативный стресс и изменения показателей обмена сиалогликоконъюгантов печени крыс с аллоксановым диабетом // Сахарный диабет. 2022. Т. 25, Т 3. С. 249–255. doi: 10.14341/DM12763
18. Miller E.S., Apple C.G., Kannan K.B., et al. Chronic stress induces persistent low-grade inflammation // Am J Surg. 2019. Vol. 218, N 4. P. 677–683. doi: 10.1016/j.amjsurg.2019.07.006
19. Оксюзян А.В. Влияние даларгина на обмен сиалогликопротеинов в тканях желудка крыс различной устойчивостью к стрессу при длительной иммобилизации // Аспирантский вестник Поволжья. 2011. № 1-2. С. 199–201.
20. Юматов Е.А., Мещеряков О.А. Прогнозирование устойчивости к эмоциональному стрессу на основе индивидуального тестирования поведения // Журнал высшей нервной деятельности им. И.П. Павлова. 1990. Т. 40, № 3. С. 575–580.
21. Пшенникова М.Г. Стресс: регуляторные системы и устойчивость к стрессорным повреждениям // Дизрегуляторная патология. 2002. С. 307–328.

REFERENCES

1. Selye H. *Essays on the adaptation syndrome*. Moscow: Medgiz; 1960. 254 p. (In Russ).
2. Bashkatova VG, Sudakov SK. Modern approaches to the study of genetically determined resistance of laboratory animals to stress loads (review). *Bulletin of Medical Science*. 2018;1:34–38. (In Russ).
3. Ebzeeva EYu, Polyakova OA. Stress and stress-induced disorders. *Medical Council*. 2022;16(2):127–133. (In Russ). doi: 10.21518/2079-701X-2022-16-2-127-133
4. Zajnaeva TP, Yegorkina SB. Impact of the low-frequency rotating electric field on the «mother–placenta–fetus» system in rats with various prognostic stress resistance. *Ekologiya cheloveka (Human Ecology)*. 2016;23(8):3–7. (In Russ). doi: 10.33396/1728-0869-2016-8-3-7
5. Prijahin EA. Adaptivnye reakcii pri vozdeystvii faktorov jelektromagnitnoj prirody. *Vestnik Cheljabinskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta*. 2006;(6):136–145. (In Russ).
6. Ryabov YuG, Lomaev HV, Tyurenkov SN. Rotating electromagnetic field — physical factor to sanitary inspection. *Technologies of electromagnetic compatibility (Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti)*. 2017;1:38–45. (In Russ).
7. Amanbaeva GM. Issledovanie vlijanija jelektromagnitnogo izlucheniya na zhivoj organism. *Problems of Modern Science and Education*. 2018;13:19–22. (In Russ).
8. Mizrahi M, Adar T, Lalazar G, et al. Glycosphingolipids prevent APAP and HMG-CoA reductase inhibitors-mediated liver damage: a novel method for “safer drug” formulation that prevents drug-induced liver injury. *J Clin Transl Heparol*. 2018;6(2):127–134. doi: 10.14218/JCTH.2017.00071
9. Vorontsova TS, Isakova LS, Vasiliev YuG, Vasilyeva NN. Influence of technogenic rotating electric field on the structure of the liver in rats. *Morphology*. 2020;157(2-3):52–53. (In Russ).
10. Visser EA, Moons SJ, Timmermans SBPE, et al. Sialic acid O-acetylation: from biosynthesis to roles in health and disease. *J Biol Chem*. 2021;297(2):100906. doi: 10.1016/j.jbc.2021.100906
11. Watanabe Y, Watanabe S, Fukui Y, et al. Functional and structural characterization of a novel L-fucose mutarotase involved in non-phosphorylative pathway of L-fucose metabolism. *Biochem Biophys Res Commun*. 2020;528(1):21–27. doi: 10.1016/j.bbrc.2020.05.094
12. Jin X, Zhou R, Huang Y. Role of inflammasomes in HIV-1 infection and treatment. *Trends Mol Med*. 2022;28(5):421–434. doi: 10/1016/j.molmed.2022.02.010
13. Abramova AYU, Koplík 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. (In Russ). doi: 10.23888/PAVLOVJ201927110-19
14. Permjakov AA, Eliseeva EV. *Analiz povedencheskih reakcij u jeksperimental'nyh zhivotnyh s razlichnoj stress-ustojchivost'ju*. Isakova LS, editor. Izhevsk: KnigoGrad; 2017. (In Russ).
15. Sudakov KV, Umrjuhín PE. *Sistemnye osnovy jemocional'nogo stressa*. Moscow: GJeOTAR-Media; 209. 105 p. (In Russ).
16. Volkhina IV. Izmenenie soderzhanija sialovyh kislot v plazme krovi krys pri stressovyh vozdeystvijah. *Medicine: Theory and Practice*. 2019;4:144. (In Russ).
17. Volkhina IV, Butolin EG. Oxidative stress and changes in liver sialoglycoconjugate metabolic parameters in rats with alloxanic diabetes mellitus. *Diabetes Mellitus*. 2022;25(3):249–255. (In Russ). doi: 10.14341/DM12763
18. Miller ES, Apple CG, Kannan KB, et al. Chronic stress induces persistent low-grade inflammation. *Am J Surg*. 2019;218(4):677–683. doi: 10.1016/j.amjsurg.2019.07.006
19. Oksuzyan AV. The Dalargin influence on the exchange of sialoglycoproteins in the tissues of rats stomach with different resistance to stress in prolonged immobilization. *Postgraduate Bulletin of the Volga Region*. 2011;(1-2):199–201. (In Russ).
20. Iumatov EA, Meshcheriakov OA. The prediction of resistance to emotional stress based on the individual testing of behavior. *Zh Vyssh Nerv Dejat Im I P Pavlova*. 1990;40(3):575–580. (In Russ).
21. Pshennikova MG. Stress: reguljatornye sistemy i ustojchivost' k stressornym povrezhdenijam. *Dizreguljacionnaja patologija*. 2002. P. 307–329. (In Russ).

ОБ АВТОРАХ

* **Воронцова Татьяна Сергеевна**, ассистент;
адрес: 426034, Россия, Ижевск, ул. Коммунаров, д. 281;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6343-8549>;
eLibrary SPIN: 3899-4753;
e-mail: solnoshko@udm.ru

Васильева Наталья Николаевна, д.м.н., доцент;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7062-9988>;
eLibrary SPIN: 9263-3209;
e-mail: doctornava@list.ru

Бутолин Евгений Германович, д.м.н., профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4555-4969>;
eLibrary Author ID: 283195;
e-mail: kld.igma@mail.ru

Иванов Вадим Геннадьевич, к.м.н., доцент;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2194-0571>;
eLibrary SPIN: 5289-8197;
e-mail: kld.igma@mail.ru

Исакова Лариса Сергеевна, д.м.н., профессор;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4780-8720>;
eLibrary SPIN: 6669-6007;
e-mail: norm-phys_igma@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

AUTHORS' INFO

* **Tatyana S. Vorontsova**, assistant lecturer;
address: 281 Kommunarov street, 426034 Izhevsk, Russia;
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6343-8549>;
eLibrary SPIN: 3899-4753;
e-mail: solnoshko@udm.ru

Natalia N. Vasileva, MD, Dr. Sci. (Med.), associate professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7062-9988>;
eLibrary SPIN: 9263-3209;
e-mail: doctornava@list.ru

Evgeny G. Butolin, MD, Dr. Sci. (Med.), professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4555-4969>;
eLibrary Author ID: 283195;
e-mail: kld.igma@mail.ru

Vadim G. Ivanov, MD, Cand. Sci. (Med.), associate professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2194-0571>;
eLibrary SPIN: 5289-8197;
e-mail: kld.igma@mail.ru

Larisa S. Isakova, MD, Dr. Sci. (Med.), professor;
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4780-8720>;
eLibrary SPIN: 6669-6007;
e-mail: norm-phys_igma@mail.ru