

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ТКАНЕВОГО ОКИСЛИТЕЛЬНОГО МЕТАБОЛИЗМА

Раваева М.Ю., Чуян Е.Н., Черетаев И.В.

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского
просп. Вернадского, 4, г. Симферополь, 295007, РФ; e-mail: ravaevam@yandex.ru
Поступила в редакцию 12.08.2022. DOI: 10.29039/rusjbpс.2022.0574

Аннотация. В работе рассматриваются показатели тканевого окислительного метаболизма у крыс после 10-тикратного воздействия низкоинтенсивным электромагнитным излучением крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) или миллиметрового (мм) диапазона. Эксперимент проводили на 40 половозрелых крысах-самцах линии *Wistar* массой 200-220 г, которые содержались в условиях вивария с естественным световым режимом. Животных разделили на 2 группы по 20 крыс в каждой. Животные, находящиеся в первой группе, являлись биологическим контролем и подвергались ложному воздействию ЭМИ КВЧ (плацебо), животные второй группы подвергались мм-воздействию в течение 10 сеансов ежедневно, в утреннее время. На 10-е сутки мм-воздействия проводилась регистрация показателей тканевой флуоресценции кожи основания хвоста диагностическим комплексом “ЛАЗМА МЦ” (Модификация ЛАЗМА-МЦ-III, пр-во ООО НПП “ЛАЗМА”, Москва, Россия). Результаты исследования показали, что у крыс, подвергшихся 10-тикратному мм-воздействию наблюдалось повышение значений нормированных амплитуд флуоресценции NADH и увеличение амплитуд FAD на 82,5% ($p \leq 0,05$) и 42,6% ($p \leq 0,05$), а также редокс-потенциала – на 36,9% ($p \leq 0,05$) по сравнению с контролем. Эти изменения свидетельствуют, что 10-тикратное воздействие низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ вызывает увеличение вклада аэробного метаболизма у крыс в основном за счёт окислительного фосфорилирования, приводит к активации дыхательной цепи. Можно предположить, что данные перестройки в окислительном метаболизме определяются в первую очередь процессом адаптации микроциркуляторного кровотока к потребностям тканей в питательных веществах и удалению метаболитов.

Ключевые слова: тканевой окислительный метаболизм, низкоинтенсивное миллиметровое излучение, никотинамидадениндинуклеотид, флавинадениндинуклеотид, редокс-потенциал.

ВВЕДЕНИЕ

Активация процессов перекисного окисления липидов является одним из главных повреждающих факторов при различных стрессорных воздействиях, в том числе и всех патологических процессах в организме [1]. При этом в тканях организма меняется относительная концентрация флуорофоров, к которым относятся вещества, способные к испусканию видимого излучения на разных длинах волн. Наиболее значимыми объектами исследования становятся соединения, являющиеся частью механизма энергетического обмена – восстановленные пиридиннуклеотиды (НАДН, НАДФН) и окисленные флавопротеиды (флавинадениндинуклеотид, ФАД). Каждое из данных соединений характеризуется специфичными конкретно для него спектрами поглощения и эмиссии. В процессе адаптации организма к воздействию повреждающих факторов изменяется морфология тканей, в результате чего изменяются ее спектральные и оптические характеристики, что является точной характеристикой клеточного и тканевого метаболизма [2,3].

Учитывая вышеизложенное, существует необходимость поиска факторов, способных снижать негативное действие повреждающих факторов и нормализовать метаболизм в тканях. Одним из таких физических методов может служить низкоинтенсивное электромагнитное излучение крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ), или миллиметрового (мм) диапазона. Действительно, многочисленные исследования, в том числе и наши [4-7], убедительно свидетельствуют, что низкоинтенсивное мм воздействие обладает выраженной биологической эффективностью. Среди наиболее изученных эффектов ЭМИ КВЧ известны антистрессорный, иммуномодулирующий, антиоксидантный, синхронизирующий, противовоспалительный, антиноцицептивный и некоторые другие. Результаты клинических исследований свидетельствуют и об эффективном использовании ЭМИ КВЧ для лечения заболеваний, в патогенезе которых отмечаются выраженные нарушения процессов окислительного метаболизма, однако они носят в основном описательный характер, в то время как экспериментальный материал практически отсутствует. Поэтому необходимы дополнительные исследования влияния данного физического фактора на процессы тканевого метаболизма, что позволит значительно расширить представления о механизмах его биологического действия и более эффективно использовать ЭМИ КВЧ как с профилактической, так и с терапевтической целью.

Цель работы – установить изменения показателей тканевого окислительного метаболизма у крыс после 10-тикратного воздействия низкоинтенсивным электромагнитным излучением миллиметрового диапазона.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная часть работы выполнена на кафедре физиологии человека и животных и биофизики факультета биологии и химии в Центре коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика».

Эксперимент проводили на 40 половозрелых крысах-самцах линии *Wistar* массой 200-220 г, («ФГУП «Питомник лабораторных животных «Рапполово»), прошедших карантин не менее 14 дней. Животные содержались в условиях вивария с естественным световым режимом при температуре 18–22°C на подстилке «Рехофикс МК 2000» (на основе початков кукурузы), свободным доступом к воде и полноценному гранулированному корму. Эксперимент был выполнен в соответствии с «Правилами проведения работ с использованием экспериментальных животных» и ГОСТ Р 53434-2009 от 02.12.2009, правилами лабораторной практики при проведении доклинических 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 близкими конституционными особенностями, одинаково реагирующих на действие того или иного фактора.

После предварительного отбора животных разделили на 2 группы по 20 крыс в каждой. Животные первой группы являлись биологическим контролем и подвергались ложному воздействию ЭМИ КВЧ (плацебо). При этом соблюдались все условия для облучения животных, но прибор не включался в сеть.

Животные второй группы подвергались действию ЭМИ КВЧ. КВЧ-воздействие на крыс проводилось 10-тикратно, в течение 30 минут ежедневно в утреннее время путем наложения на шейно-воротниковую область волновода аппарата КВЧ-терапии «КВЧ-НД» (рабочая длина волны 7,1 мм, плотность потока мощности облучения – 4-12 мВт/см² (Производство: ООО «Научно-коммерческая фирма РЭСЛА», Россия; Декларация соответствия № РОСС Ru. МЕ67.Д00227; Рег. удостов. № ФСР 2007/00763 от 18.09.2007).

На 10-е сутки у крыс обеих групп проводилась регистрация показателей тканевой флуоресценции диагностическим комплексом «ЛАЗМА МЦ» (Модификация ЛАЗМА-МЦ-III, пр-во ООО НПП «ЛАЗМА», Москва, Россия). Поскольку данный метод является высокочувствительным, то для сведения к минимуму внешних помех крысу на время записи помещали в прозрачный пенал из оргстекла, ограничивающий подвижность животного. Размер пенала подбирали так, чтобы животное могло свободно дышать, и ни одна часть тела не была плотно зажата. Хвост крысы фиксировали на ровной поверхности на одной линии с телом в горизонтальном положении тканевым пластырем. Оптоволоконный зонд прибора «Лазма-МЦ» также фиксировали тканевым пластырем перпендикулярно у основания хвоста. Сигнал записывали в тот момент, когда животное находилось в спокойном состоянии.

В доплеровском канале ЛАЗМА-МЦ-III использовали лазерный модуль с длиной волны излучения 1064 нм, для инициации флуоресценции применялись источники излучения с длинами волн 365 и 450 нм. Подвод зондирующего излучения и прием обратно отраженного от ткани вторичного излучения осуществляли одним оптическим волоконным зондом с диаметром 3 мм. В канале флуоресцентной спектроскопии диаметры каждого зондирующего и принимающего волокон составляли 400 мкм. Расстояние между источником и приемником устанавливали в пределах 1 мм. Числовая апертура волокон – 0,22. Общий принцип работы зондов диагностического комплекса «ЛАЗМА-МЦ» показан на рисунке 1.

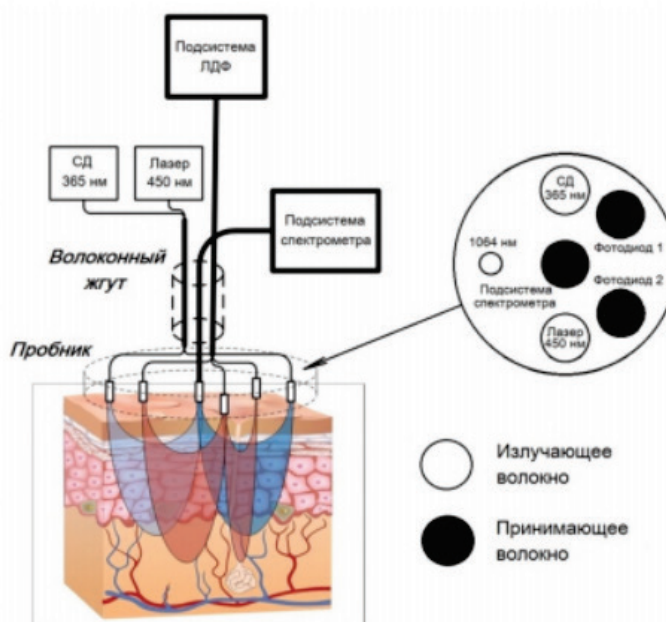


Рисунок 1. Общий принцип работы зондов диагностического комплекса «ЛАЗМА-МЦ»

Метод флуоресцентной спектроскопии позволяет оценить интенсивность окислительного метаболизма *in vivo* за счет прижизненной регистрации содержания в тканях эндогенных флуорофоров, определяющих метаболизм и энергообеспечение клеток путем регистрации переизлучения поглощенной ими энергии.

Для оценки внутриклеточных энергетических обменных процессов методом флуоресцентной спектроскопии оценивали следующие показатели:

- индекс тканевого содержания для восстановленного *NADH*;
- индекс тканевого содержания для окисленной формы *FAD*.
- редокс-соотношение амплитуды флуоресценции *NADH* и амплитуды флуоресценции *FAD*.

Установлено, что восстановленная форма кофермента *NADH* и окисленная форма *FAD*, определенные методом флуоресцентной спектроскопии, пропорциональны локальной клеточной концентрации этих коферментов и являются индикатором состояния метаболического процесса в биоткани [8,9].

При анализе полученных данных мы опирались на следующие сокращения и их значения: UV – нормированная амплитуда флуоресценции кофермента НАДН; В – нормированная амплитуда флуоресценции ФАД; PO – отношение нормированной амплитуды флуоресценции НАДН к нормированной амплитуде флуоресценции ФАД; Мпм – среднее арифметическое значение показателя микроциркуляции; Δ – разница между результатами на разных этапах исследований; % – отношение в процентах между результатами исследований.

Индексы тканевого метаболизма вычисляли по следующей формуле:

$$I^{\lambda_1/\lambda_2} = \frac{\beta I_f^{\lambda_1}}{I \lambda_1^2} + \beta I_f^{\lambda_2}, \quad (1)$$

где I^{λ_1/λ_2} – определяемый индекс тканевого содержания вещества, λ_1 и λ_2 – используемые длины волн (нм) для возбуждения и регистрации флуоресценции соответственно, β – коэффициент ослабления порогового фильтра в приборе [8].

- редокс-отношение или индекс флуоресценции, определяемого по формуле:

$$PO = \frac{I_f^{NADH}}{I_f^{FAD}} \times \frac{I^{FAD}}{I^{NADH}}. \quad (2)$$

Из вышесказанного следует вывод, что редокс-потенциал прямо пропорционально связан с интенсивностью окислительного метаболизма. Клеточный метаболизм, как одна из составных частей микроциркуляторной системы, неинвазивно диагностируется с использованием метода лазерной флуоресцентной спектроскопии. В качестве индикаторов окислительного метаболизма используют данные о флуоресценции следующих коферментов: восстановленный *NADH* (никотинамидадениндинуклеотид) и окисленный *FAD* (флавинадениндинуклеотид), содержащихся в тканях микрососудистого русла. *NADH* транспортирует электроны к молекулярному кислороду, таким образом являясь донором, в то время как *FAD* их присоединяет [9].

Существуют особенности локализации этих веществ в клетке – *FAD* содержится строго в митохондриях, а *NADH* – как в митохондриях, так и в цитоплазме, что обеспечивает выполнение данными коферментами своих функций в дыхательной цепи. Считается, что интенсивность флуоресценции *NADH* в цитоплазме наименее значимо в оптической диагностике. Для стимуляции флуоресценции *NADH* применяют излучение при длине волны 365 нм, спектр флуоресценции *NADH* – около 460-470 нм. Для возбуждения *FAD* применяют излучение при длине волны 450 нм, а спектр флуоресценции *FAD* – около 510-520 нм.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета «STATISTICA – 8.0». Поскольку распределение экспериментальных значений в группах отличалось от нормального, то оценку достоверности межгрупповых различий проводили с помощью U-теста Манна-Уитни.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты настоящего исследования показали, как видно в таблице 1 и на рисунке 2, что у крыс, подвергшихся 10-тикратному КВЧ-воздействию отмечено повышение значений нормированных амплитуд флуоресценции *NADH* и увеличение амплитуд *FAD* на 82,5% ($p < 0,05$) и 42,6% ($p < 0,05$) соответственно по сравнению с таковыми в контрольной группе крыс, показатели которых находились в пределах физиологической нормы.

Известно, что в качестве доноров восстановленной формы *NADH* в клетке рассматривают цикл Кребса, гликолиз и бета-окисление жирных кислот. При этом в коже преобладают первые два, но лишь цикл Кребса отвечает за выработку митохондриального *NADH*, который регистрируется при флуоресцентной микроскопии. *NADH*, выработанный в результате гликолиза в цитоплазме, практически не флуоресцирует [8]. В дальнейшем восстановленная форма этого кофермента попадает в первый белковый комплекс окислительного фосфорилирования, где и подвергается дальнейшему окислению. Стоит отметить, что *NADH*-дегидрогеназный комплекс играет одну из ключевых ролей в клеточном дыхании, обеспечивая 40% протонного градиента для синтеза АТФ.

Окисленная форма *FAD* участвует в реакциях 2-го комплекса окислительного фосфорилирования, а также в глицерол-3-фосфатном комплексе гликолиза. Однако ввиду того, что последний протекает в цитоплазме, существенного отклика от этой формы *FAD* при регистрации методом флуоресцентной спектроскопии не наблюдается, соответственно этим метаболическим путем в настоящем исследовании можно пренебречь.

Таблица 1. Показатели спектроскопической флуоресценции тканей у крыс, подвергшихся 10-тикратному КВЧ-воздействию

Показатели	Группы животных	
	Контрольная	КВЧ-воздействие
<i>NADH</i>	2,47±0,23	3,21±0,13 p≤0,05
<i>FAD</i>	3,06±0,28	4,54±0,14 p≤0,05
PO	0,81±0,08	1,08±0,06 p≤0,05

Примечание: достоверность межгрупповых различий – p≤0,05 по критерию Манна-Уитни; PO – редокс отношение (редокс-потенциал), FAD – флавинадениндинуклеотид фосфат, NADH – никотинамидадениндинуклеотид фосфат

Следовательно, ведущий механизм, в котором фигурирует окисленная форма *FAD* – 2-й комплекс электрон-транспортной цепи.

Таким образом, увеличение нормированных величин флуоресценции *NADH* и *FAD* под влиянием мм излучения свидетельствует об увеличении вклада аэробного метаболизма у крыс в основном за счёт окислительного фосфорилирования. Регистрируемые колебания концентраций восстановленной формы *NADH* и окисленной формы *FAD* могут быть сложными, а динамика этих колебаний может быть нелинейной в течение всего жизненного цикла клеток.

При проведении оценки функционального состояния митохондрий и активности окислительно-восстановительных процессов в клетке важным индикатором кислородного метаболизма является не только концентрация коферментов – восстановленной формы *NADH* и окисленной – *FAD*, но и их соотношение – редокс-отношение (редокс-потенциал). Именно по величине данного показателя можно говорить о способности веществ отдавать и присоединять электроны, а также о скорости протекания окислительно-восстановительных реакций. Как продемонстрировано в таблице 1 и на рисунке 2, после 10-тикратного КВЧ-воздействия редокс-потенциал увеличился на 36,9% (p≤0,05) относительно контрольной группы. Повышение редокс-потенциала у крыс так же является свидетельством увеличения окислительного фосфорилирования в тканях.

Увеличение концентрации и интенсивности флуоресценции *NADH* и повышение *FAD* свидетельствует о росте потребности клеток в АТФ и преобладании окислительного фосфорилирования над другими процессами [1]. Для стандартной клетки в нормальных условиях с оптимальным количеством питательных веществ и кислорода повышение потребности в АТФ влечет за собой рост редокс-отношения. Это связано с потерей NADH иона водорода и окисление его до *NAD+* в процессе окислительного фосфорилирования. При гипоксии в условиях недостатка кислорода, который является главным конечным акцептором электронов в дыхательной цепи митохондрий, протекание реакций окислительного фосфорилирования становится практически не осуществимым и наблюдается увеличение концентрации *NADH*. Чтобы обеспечить энергетическую потребность

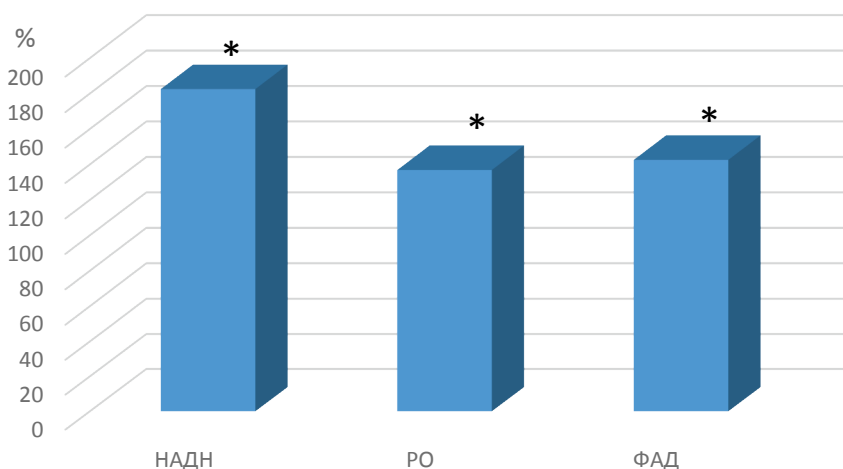


Рисунок 2. Показатели спектроскопической флуоресценции тканей у крыс, подвергшихся 10-тикратному КВЧ-воздействию (в % относительно значений в контрольной группе животных, принятых за 100%). Об* – уровень достоверности различий по критерию Манна-Уитни; PO – редокс отношение (редокс-потенциал), FAD – флавинадениндинуклеотид фосфат, NADH – никотинамидадениндинуклеотид фосфат

в АТФ, клетка меняет тип обмена веществ на анаэробный гликолиз, в результате которого НАД⁺ присоединяет ион водорода и восстанавливается до НАДН с конечным образованием пирувата и АТФ. Отсутствие окисления НАДН через электронно-транспортную цепь и повышение концентрации восстановленной формы НАДН в процессе гликолиза приводит к повышению интенсивности флюоресценции НАДН в клетке. Повышение редокс-потенциала в данном случае может свидетельствовать об активации дыхательной цепи [3] при 10-тикратном КВЧ-воздействии.

Исходя из вышеизложенного, можно заключить, что при 10-тикратном воздействии низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ происходит увеличение концентрации и интенсивности флюоресценции НАДН и повышение FAD и редокс-соотношения, что свидетельствует о росте потребности клеток в АТФ и преобладании окислительного фосфорилирования над другими процессами, что в целом свидетельствует об активации дыхательной цепи. Можно предположить, что данные перестройки в окислительном метаболизме определяются в первую очередь процессом адаптации микроциркуляторного кровотока к потребностям тканей в питательных веществах и удалению метаболитов.

Список литературы / References:

1. Курганова Л.Н. Перекисное окисление липидов – одна из возможных компонент быстрой реакции на стресс. *Вестник Нижегородского Университета им. Н.И. Лобачевского. Серия Биология*, 2001, № 2, с. 74-76. [Kurganova L.N. Lipid peroxidation is one of the possible components of a rapid reaction to stress. *Vestnik of Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod. Biology*, 2001, no. 2, pp. 74-76. (In Russ.)]
2. Москвин С.В., Антипов Е.В., Зарубина Е.Г., Рязанова Е.А. Эффективность кислородного обмена после применения лазерофореза различных гелей на основе гиалуроновой кислоты. *Вестник Эстетической Медицины*, 2011, т. 10, № 3, с. 48-55. [Moskvin S.V., Antipov E.V., Zarubina E.G., Ryazanova E.A. Oxygen exchange effectiveness after application of different gels based on hyaluronic acid laser-phoresis. *Bulletin of Aesthetic Medicine*, 2011, vol. 10, no. 3, pp. 48-55. (In Russ.)]
3. Новиков В.Е., Левченкова О.С., Пожилова Е.В. Роль активных форм кислорода в физиологии и патологии клетки и их фармакологическая регуляция. *Обзоры по клинической фармакологии и лекарственной терапии*, 2014, т. 12, № 4, с. 13-21. [Novikov V.E., Levchenkova O.S., Pozhilova Ye.V. Role of reactive oxygen species in cell physiology and pathology and their pharmacological regulation. *Reviews on Clinical Pharmacology and Drug Therapy*, 2014, vol. 12, no. 4, pp. 13-21. (In Russ.)]
4. Чуян Е.Н., Бирюкова Е.А., Раваева М.Ю. Изменение показателей функционального состояния человека под воздействием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ. *Физика живого*, 2008, т. 16, № 1, с. 91-98. [Chuyan E.N., Birukova E.A., Ravaeva M.Y. Modification of indices of human functional state under low-intensity electromagnetic radiation of very high frequency. *Physics of the living*, 2008, vol. 16, no. 1, pp. 91-98. (In Russ.)]
5. Чуян Е.Н., Раваева М.Ю. Механизмы действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты на тканевую микрогемодинамику. В сб.: «Космос и биосфера. Тезисы докладов XII Международной крымской конференции, посвященной 100-летию Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского, 120-летию А.Л. Чижевского, 100-летию В.А. Троицкой и 130-летию П.М. Нагорского», Алушта, 2017, с. 158-162. [Chuyan E.N., Ravaeva M.Yu. Mechanisms of action of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency on tissue microhemodynamics. In: *Space and the biosphere. Abstracts of the XII International Crimean Conference dedicated to the 100th anniversary of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University, the 120th anniversary of A.L. Chizhevsky, the 100th anniversary of V.A. Troitskaya and the 130th anniversary of P.M. Nagorsky*», Alusta, 2017, pp. 158-162. (In Russ.)]
6. Чуян Е.Н., Раваева М.Ю. Механизмы вазопротекторного действия электромагнитного излучения крайне высокой частоты в условиях хронического гипокинетического стресса. *Биомедицинская радиоэлектроника*, 2017, № 3, с. 55-65. [Chuyan E.N., Ravaeva M.Y. Vasoprotective mechanisms of action of electromagnetic radiation of extremely high frequency in chronic hypokinetic stress. *Journal Biomedical Radioelectronics*, 2017, no. 3, pp. 55-65. (In Russ.)]
7. Чуян Е.Н., Раваева М.Ю. Роль катехоламинов в регуляции тканевого кровотока при действии низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты. *Проблемы современной науки и образования*, 2014, т. 4, № 22, с. 13-18. [Chuyan E.N., Ravaeva M.Y. The role of catecholamines in the regulation of tissue blood flow under the action of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency. *Problems of Modern Science and Education*, 2014, vol. 4, no. 22, pp. 13-18. (In Russ.)]
8. Крупаткин А.И. *Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: рук-во для врачей*. М.: Librocom, 2014, 498 с. [Krupatkin A.I. *Functional diagnostics of the state of microcirculatory and tissue systems: fluctuations, information, nonlinearity: guide for doctors*. M.: Librocom, 2014, 498 p. (In Russ.)]
9. Серёгина Е.С., Стельмашук О.А., Пьявченко Г.А., Воробьев Е.В., Кузнецова Е.А., Алексеев А.Г., Жеребцов Е.А., Подмастерьев К.В., Дунаев А.В. Оценка влияния антиоксидантных веществ на метаболические процессы клеток головного мозга методом флуоресцентной спектроскопии. *Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии*, 2018, № 1, с. 62-66. [Seregina E.S., Stelmaschuk O.A., Piyavchenko G.A., Vorobyev E.V., Kuznetsova E.A., Alekseev A.G., Zherebtsov E.A., Journeymen K.V., Dunaev A.V. Evaluation of the effect of antioxidant substances on the metabolic processes of brain cells by fluorescence spectroscopy. *Physics and Radio Electronics in Medicine and Ecology*, 2018, no. 1, pp. 62-66. (In Russ.)]

THE EFFECT OF LOW-INTENSITY ELECTROMAGNETIC RADIATION OF EXTREMELY HIGH FREQUENCY ON THE INDICATORS OF TISSUE OXIDATIVE METABOLISM**Ravaeva M.Yu., Chuyan E.N., Cheretaev I.V.**

V.I. Vernadsky Crimean Federal University

Vernadsky Ave., 4, Simferopol, 295007, Russia; e-mail: ravaevam@yandex.ru

Received 12.08.2022. DOI: 10.29039/rusjbp.2022.0574

Abstract. The paper considers the indicators of tissue oxidative in rats after 10-fold exposure to low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter range. The experiment was carried out on 40 mature male rats of the Wistar line weighing 200-220 g, which were kept in a vivarium with a natural light regime. The animals were divided into 2 groups of 20 rats each. The animals in the first group were biological controls and were in normal vivarium conditions, the animals of the second group were exposed to EHF EMR for 10 sessions daily, in the morning. On the 10th day of EHF exposure, tissue fluorescence indicators were recorded by the diagnostic complex "LAZMA MC" (Modification of LAZMA-MC-III, LAZMA, Moscow, Russia). The results of the study showed that rats exposed to 10-fold EHF exposure had an increase in the values of normalized NADH fluorescence amplitudes and an increase in FAD amplitudes by 82.5% ($p < 0.05$) and 42.6% ($p < 0.05$), as well as redox potential - by 36.9% ($p < 0.05$), respectively, compared to with control. These changes indicate that 10-fold exposure to low-intensity EHF EMR causes an increase in the contribution of aerobic metabolism in rats mainly due to oxidative phosphorylation, leads to activation of the respiratory chain. It can be assumed that these changes in oxidative metabolism are determined primarily by the process of adaptation of microcirculatory blood flow to the needs of tissues for nutrients and the removal of metabolites.

Key words: *tissue oxidative metabolism, low-intensity millimeter radiation, nicotinamide adenine dinucleotide, flavinadenine dinucleotide, redox potential.*