

ДИСКУССИИ

DOI: <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609>

УДК 612.014.42

© Коллектив авторов, 2020

Чуян Е.Н., Трибрат Н.С., Дзельдубаева Э.Р.

Изменение кожной микроциркуляции в ответ на воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона

ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», г. Симферополь, пр-т Вернадского, 4, Россия, 295007

Тканевая микрогемодинамика играет значительную роль в поддержании тканевого гомеостаза, и ее изменения сопровождают любые патологические процессы, поэтому актуальными для изучения являются эффективные и безопасные способы ее коррекции. Одним из таких способов является воздействие низкоинтенсивным электромагнитным излучением миллиметрового (ММ) диапазона, которое, согласно литературным данным, обладает выраженной биологической активностью.

Цель исследования — выявление изменений процессов микроциркуляции в коже человека при воздействии низкоинтенсивного ЭМИ ММ диапазона (длина волны — 7,1 мм; плотность потока мощности — 0,1 мВт/см²).

Исследование проведено на 40 девушках-волонтерах в возрасте 18–20 лет. Воздействие низкоинтенсивным ММ излучением осуществляли ежедневно в течение 10 суток с экспозицией по 30 минут на область биологически активной точки GI-4. Регистрацию показателей микроциркуляции проводили методом лазерной доплеровской флоуметрии как в области воздействия ММ излучения (контактная точка регистрации), так и в симметричной области воздействия (дистантная точка) для выявления локальных и системных изменений тканевого кровотока при действии данного физического фактора.

Результаты исследования позволили впервые выявить, что при воздействии низкоинтенсивным ММ излучением отмечались локальные изменения тканевого кровотока в области контактной точки, проявляющиеся в изменении миогенной и эндотелиальной осцилляторной активности, уже начиная с первых сеансов воздействия, что свидетельствует о снижении периферического сопротивления прекапиллярных сфинктеров и возрастании секреторной активности микрососудистого эндотелия; изменения нейрогенных осцилляций — начиная с третьего сеанса, что сопровождается снижением артериолярного сопротивления; изменения пульсовых колебаний — в течение последнего десятого сеанса воздействия, что является указанием на увеличение артериолярного кровенаполнения. Указанные изменения сохранялись в течение всего периода воздействия данным физическим фактором.

Системные изменения показателей микроциркуляции в дистантной симметричной точке при курсовом действии ММ излучением характеризовались изменением нейрогенного осцилляторного компонента, начиная с третьего сеанса воздействия, изменением амплитуды эндотелиальных и пульсовых осцилляций — в течение десятого сеанса.

Ключевые слова: низкоинтенсивное электромагнитное излучение миллиметрового диапазона; тканевая микрогемодинамика; осцилляторные показатели микрогемодинамики

Для цитирования: Чуян Е.Н., Трибрат Н.С., Дзельдубаева Э.Р. Изменение кожной микроциркуляции в ответ на воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона. *Мед. труда и пром. экол.* 2020; 60(9). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609>

Для корреспонденции: Трибрат Наталья Сергеевна, доц. каф. физиологии человека и животных и биофизики Таврической академии (СП) ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского», канд. биол. наук. E-mail: tribratnatalia@rambler.ru

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Дата поступления: 15.06.2020 / Дата принятия к печати: 12.08.2020 / Дата публикации: 07.10.2020

Elena N. Chuyan, Natalya S. Tribat, Elviza R. Dzheldubayeva

Changes in skin microcirculation in response to low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter range

V.I. Vernadsky Crimean Federal University, 4, Vernadskogo Ave., Simferopol, Russia, 295007

The tissue microhemodynamics plays a significant role in a tissue homeostasis. Any pathological processes were changes in functioning of microhemodynamics. This is causes is significant interesting to safe methods for its correction. One of such methods is exposure to low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter (MM) range, which has pronounced of biological activity.

The aim of the work was to identify changes in the processes of microcirculation in human skin when exposed to a low-intensity EMR MM range (wavelength — 7.1 mm; power flux density — 0.1 mW/cm²).

The study was conducted on 40 volunteer girls aged 18–20 years. The exposure of low-intensity MM radiation was carried out daily for 10 days with an exposure of 30 minutes on the area of biologically active area GI-4. Microcirculation indices were recorded by laser Doppler flowmetry both in the area of influence of MM radiation (contact point of registration) and in the symmetrical effect of the area (distant point) to detect local and systemic changes in tissue blood flow under the action of this physical factor.

The results of the study revealed for the first time that when exposed to low-intensity MM radiation, local changes in tissue blood flow in the contact point area were observed, manifested in changes in myogenic and endothelial oscillatory activity, starting from the first sessions of exposure, which indicates a decrease in peripheral resistance of precapillary sphincters and an increase in secretory activity of microvascular endothelium; changes in neurogenic oscillations-starting from the third session, which is accompanied by a decrease in arteriolar resistance; changes in pulse fluctuations — during the last tenth session of exposure, which is an indication of an increase in arteriolar blood filling. These changes were maintained during the entire period of exposure to this physical factor.

Systemic changes in microcirculation parameters at a distant symmetrical point during the course action of MM radiation were characterized by changes in the neurogenic oscillator component, starting from the third session of exposure, and changes in the amplitude of endothelial and pulse oscillations — during the tenth session.

Key words: low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter range; tissue microhemodynamics; oscillatory microhemodynamics indicators

For citation: Chuyan E.N., Tribat N.S., Dzheldubayeva E.R. Changes in skin microcirculation in response to low-intensity electromagnetic radiation of the millimeter range. *Med. truda i prom. ekol.* 2020; 60(9). <https://doi.org/10.31089/1026-9428-2020-60-9-605-609>

For correspondence: Natalia S. Tribat, associate professor of human and animal physiology department of Biophysics, Tauride Academy of Vernadsky Crimean Federal University, Dr. of Sci. (Biol.). E-mail: tribratnatalia@rambler.ru

Funding. The study had no funding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Information about authors:Chuyan E.N. <https://orcid.org/0000-0001-6240-2732> Tribat N.S. <https://orcid.org/0000-0002-6800-1419>Dzheldubayeva E.R. <https://orcid.org/0000-0001-9472-2597>

Received: 15.06.2020 / Accepted: 12.08.2020 / Published: 07.10.2020

Главной задачей микроциркуляторной системы является обеспечение обмена между кровью и тканями. Поэтому, функционирование микроциркуляции отражает информацию о состоянии не только отдельных органов, но и организма в целом, что позволяет использовать ее показатели в качестве как прогностических, так и диагностических критериев в оценке функционирования организма [1].

При этом реакция со стороны системы микроциркуляции в ответ на действие факторов различной природы определяет прогноз дальнейшего функционирования организма, в связи с чем является важным ее отклик в ответ на воздействующие факторы электромагнитной природы, однако этот вопрос до конца еще не исследован.

Воздействие электромагнитных излучений (ЭМИ) различных диапазонов и интенсивностей находит свое применение в терапевтической практике [2–4] тех состояний, которые сопровождаются расстройством функционирования микрососудистого русла [5–8].

Вопрос о пороговом значении интенсивности действующего ЭМП в отношении определенного биологического эффекта остается неопределенным, поскольку известно, что возможно зарегистрировать биологический эффект в случае действия сверхнизких стимулов, о чем свидетельствуют результаты ряда исследований [9, 10], в которых показано, что зависимость биологического эффекта от интенсивности ЭМИ имеет нелинейный характер [10–11].

Среди электромагнитных факторов низкой интенсивности особого внимания заслуживают ЭМИ миллиметрового (ММ) диапазона, поскольку данные излучения не вызывают структурных изменений в организме, однако сопровождаются значительными биологическими ответами при минимальной затрате энергии [5, 9]. Зависимость изменения показателей микроциркуляции от экспозиции и длительности курсового действия факторов электромагнитной природы практически не исследована.

В современных исследованиях и в практической медицине широко используется лазерная доплеровская флоуметрия (ЛДФ) — неинвазивный метод исследования, предоставляющий широкие возможности оценки состояния тканевого кровотока [12]. Особое значение имеет и тот факт, что проникающая способность ММ излучения и лазерного луча при ЛДФ-метрии в кожу практически совпадают (до 1 мм). Таким образом, данный метод исследования является наиболее оптимальным для выявления изменений в системе микроциркуляции кожи при воздействии эффектов ЭМИ ММ диапазона в микроциркуляторном русле кожи.

В этой связи целесообразно увеличить круг оцениваемых параметров, дающих представление об изменении основных механизмов регуляции тканевого микроциркуляторного русла.

Цель исследования — установление основных механизмов действия ЭМИ ММ-диапазона (длина волны — 7,1 мм; плотность потока мощности — 0,1 мВт/см²) на тканевую микрогемодинамику здоровых испытуемых.

Исследования процессов микроциркуляции при действии низкоинтенсивного ЭМИ ММ проведены на 40 студентах-волонтерах без патологии сердечно-сосудистой системы в возрасте 18–20 лет с соблюдением современных биоэтических норм, включающих получение добровольного согласия на участие в исследовании. Выборка гендерно однородная (девушки).

Испытуемые были разделены на две группы по 20 человек в каждой. Волонтеры экспериментальной группы подвергались действию низкоинтенсивного ЭМИ ММ излучения, а волонтеры контрольной — ложному воздействию данного физического фактора (пальцебо). Экспериментальное воздействие ММ излучения осуществлялось на протяжении 10 дней, ежедневно, в утреннее время суток на аппарате «РАМЕД. ЭКСПЕРТ-04»

($\lambda=7,1$ мм, частота излучения 42,4 ГГц, плотность потока мощности — 0,1 мВт/см²) (производство научно-исследовательской лаборатории «Рамед», г. Днепропетровск; регистрационное свидетельство МЗН[№]783/99 от 14.07.99). Воздействие ММ-излучением производилось на область биологически активной точки GI-4 правой руки.

Для регистрации показателей микроциркуляции использовался метод ЛДФ [12]. ЛДФ-метрию проводили на двухканальном анализаторе микроциркуляции «ЛАКК-02» во втором исполнении (НПП «Лазма», Россия), что позволило провести одномоментный мониторинг и сравнительный анализ тканевого кровотока в симметричных тестируемых областях, когда одна из симметричных областей ЛДФ-метрии являлась зоной, на которую осуществляется воздействие ЭМИ ММ (область GI-4 правой руки — экспериментально-измерительная точка), в то время как вторая область тестирования являлась интактной, то есть контрольной (область симметричной БАТ контралатеральной кисти — GI-4 левой руки — контрольно-измерительная точка). Такой подход позволил выявить и дифференцировать как локальные процессы, протекающие непосредственно в области ММ воздействия, так и генерализованные, протекающие в симметричной области.

В обеих точках одновременно регистрировали уровень перфузии и осцилляторные показатели микрогемодинамики: амплитудные значения эндотелиальных — Аэ (0,007–0,017 Гц), миогенных — Ам (0,07–0,12 Гц), нейрогенных — Ан (0,023–0,046 Гц), пульсовых — Ап (0,85–1,36 Гц) и дыхательных — Ад (0,21–0,35 Гц) ритмов тканевого кровотока (Крупаткин 2016).

Регистрацию показателей микроциркуляции проводили до воздействия ЭМИ ММ диапазона (фон), а также в течение 1, 3, 5, 7 и 10 сеансов воздействия.

Все исследования проводились в первой половине дня с соблюдением физического и психологического покоя в положении лежа на спине. В помещении весь период исследований поддерживалась стабильная температура воздуха — 23°С. При проведении исследований показателей микроциркуляции методом ЛДФ были соблюдены условия стандартизации, выработанные группой по стандартизации ЛДФ Европейского Общества по контактному дерматиту (European Contact Dermatitis Society, 1994).

Все исследования проводились на оборудовании, прошедшем метрологическую поверку.

Статистическая обработка данных проводилась путем расчета среднего значения изучаемых показателей (М) и его ошибки (m). Оценка достоверности внутригрупповых различий полученных данных проводилась с использованием критерия Вилкоксона, межгрупповых различий — с помощью критерия парных сравнений U-теста Манна-Уитни. Внутри- и межгрупповые различия считались достоверными при $p \leq 0,05$. Расчеты и графическое оформление полученных в работе данных проводились с использованием программы Microsoft Excel и программного пакета «STATISTICA – 8.0».

Как показали результаты настоящего исследования, изученные показатели микроциркуляции у испытуемых контрольной группы на протяжении эксперимента достоверно не изменялись по отношению к исходным значениям. В то время как в группе, подвергавшейся воздействию низкоинтенсивного ММ излучения отмечались изменения показателей тканевого кровотока как в области воздействия, так и в дистантной симметричной области.

При этом некоторые показатели претерпевали изменения лишь в области воздействия ММ волн в течение всего курса. К таким показателям следует отнести амплитудные значения миогенных ритмов (Ам). Так, в экспериментально-измерительной точке отмечалось возрастание Ам, начиная с первого се-

анса, которое продолжалось во все последующие сеансы ММ воздействия в сравнении со значениями данного показателя, зарегистрированного в дистантной точке. Прирост данного показателя в течение первого сеанса ММ воздействия в экспериментально-измерительной точке составил 42% ($p \leq 0,01$) относительно значений этого показателя, зафиксированных в интактной точке (рисунок). В дальнейшем значение показателя Ам в области воздействия ЭМИ ММ сохранялось приблизительно на этом же уровне. В контрольно-измерительной точке значения показателя Ам в течение всего периода наблюдений сохранялись на исходном уровне.

Сократительная активность гладкомышечных клеток определенного региона определяет число функционирующих кожных капилляров [13]. Следовательно, возрастание этого показателя в области воздействия ЭМИ свидетельствует о снижении сократительной активности в зоне прекапиллярных сфинктеров и, соответственно, об увеличении потока крови в области гладкомышечных прекапилляров, и, как следствие, указывает на открытие большего числа капилляров, возникающего локально, под воздействием ММ излучения.

Другие показатели микрогемодинамики изменялись в течение определенного времени в области воздействия ММ излучением, однако, по мере увеличения кратности воздействий, изменения проявлялись системно, т. е. регистрировались и в интактной точке.

К таким изменениям можно отнести эндотелиальные осцилляции тканевого кровотока (Аэ), синхронизированные с периодическим релизингом главного вазоактивного вещества — оксида азота (NO) эндотелием сосудов [14]. Так, уже в течение первого сеанса ММ воздействия отмечалось возрастание амплитудных значений Аэ на 18,85% ($p \leq 0,05$) в области наложения ММ волновода, в сравнении со значениями этого показателя, зарегистрированными в интактной области экспериментальной группы.

В последующие сеансы воздействия ЭМИ ММ в экспериментально-измерительной точке отмечалось возрастание этого показателя по сравнению с исходными значениями. В интактной области отмечалось постепенное нарастание показателя Аэ в течение всего периода ММ воздействия, и к 10 суткам было зарегистрировано равнозначное возрастание амплитудных значений эндотелиальных ритмов в обеих областях ЛДФ-метрии в сравнении с исходными данными этого показателя на 23,79% ($p < 0,05$) и 22,99% ($p < 0,05$) соответственно, что свидетельствует о накопительном характере проявления генерализованной реакции микрососудистого эндотелия в ответ на действие низкоинтенсивного фактора (рисунок).

Наблюдаемое увеличение амплитуды эндотелиальных ритмов, зарегистрированное во время 10-кратного воздействия ЭМИ ММ, свидетельствует об увеличении базального уровня секреции NO и дальнейшей вазорелаксацией на системном уровне.

Другие осцилляторные компоненты ЛДФ-метрии, регистрируемые в настоящем исследовании, вовлекались в механизмы реализации вазотропного действия низкоинтенсивного ЭМИ ММ с одновременным проявлением в различных областях регистрации, что свидетельствует о генерализованном характере ответа с их стороны на этот вид воздействия. При действии низкоинтенсивного ММ излучения отмечалось возрастание амплитуд нейрогенных ритмов (Ан) в обеих областях ЛДФ-метрии, начиная с третьих суток экспозиции на 26,33% ($p < 0,05$) в области воздействия ММ излучения и на 18,38% ($p < 0,05$) в дистантной ММ воздействию области относительно исходных данных этого показателя.

В виду того, что нейрогенные осцилляции задаются нисходящими адренергическими влияниями на миоциты артериол и артериоларных участков артерио-венулярных анастомозов (АВА) [12], увеличение показателя Ан при воздействии ММ излучением является указанием о снижении симпатической импульсации, что сопровождается [15] падением периферического сопротивления в области артериол и АВА.

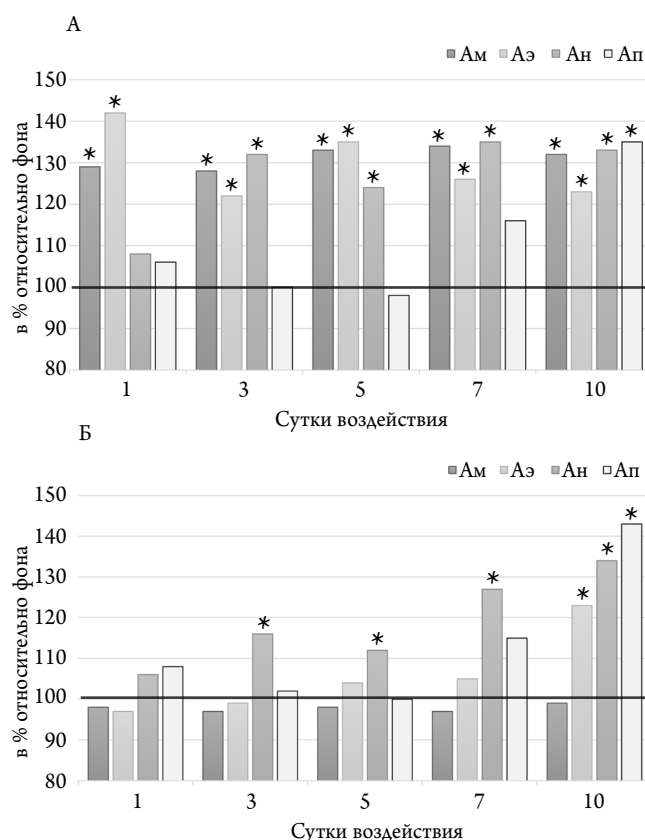


Рисунок. Динамика показателей микроциркуляции, зарегистрированная в экспериментально-измерительной точке (А) и контрольно-измерительной точке (Б), в процентах относительно значений соответствующих показателей, зарегистрированных до начала воздействия, принятых за 100%.

Figure. The dynamics of microcirculation indicators recorded at the experimental measuring point (A) and control and measuring point (B), as a percentage of the values of the corresponding indicators recorded before the start of the exposure, taken as 100%.

Примечание: достоверность различий * по критерию Манна-Уитни при $p < 0,05$ между данными, зарегистрированными в контрольно-измерительной точке и экспериментально-измерительной точках; Ам — амплитудные значения миогенных ритмов, Аэ — амплитудные значения эндотелиальных ритмов, Ан — амплитудные значения нейрогенных ритмов, Ап — амплитудные значения пульсовых ритмов.

Note: the significance of differences * according to the Mann-Whitney criterion at $p < 0.05$ between the data recorded at the control and measuring point and the experimental measuring points; Ам — amplitude values of myogenic rhythms, Аэ — amplitude values of endothelial rhythms; Ан — amplitude values of neurogenic rhythms; Ап — amplitude values of pulse rhythms.

Вероятно, снижение демпинга микроциркуляторного русла со стороны симпатических волокон способствовало умеренному росту амплитудных значений пульсовой волны (Ап) в обеих областях ЛДФ-метрии на более поздних сроках. Так, лишь во время 10-кратного ММ воздействия отмечался прирост амплитуды пульсовой волны (Ап), возрастая максимально на 32,01% ($p < 0,05$) непосредственно в области воздействия низкоинтенсивного ЭМИ ММ диапазона и на 36,79% ($p < 0,05$) в интактной точке относительно значений этого показателя, зарегистрированных до начала воздействия ЭМИ ММ.

Дыхательные осцилляции тканевого кровотока достоверно не изменялись в обеих зонах ЛДФ-метрии в течение всего периода наблюдений.

Выявленные изменения микроциркуляторных показателей привели к умеренному росту уровня перфузии, который определяется количеством движения эритроцитов, тканевым гематокритом, а также количеством функционирующих капилляров [12, 13]. Причем, в первые и третьи сутки воздействия ЭМИ ММ с учетом роста показателей Аэ и Ам, проявившихся в области ММ воздействия, рост уровня перфузии также не

сил локальный характер и составил 29,34 % ($p < 0,05$) и 34,55% ($p < 0,05$) соответственно, относительно значений этого показателя, зарегистрированных в дистантной точке. Однако, начиная с 7-микратного воздействия ЭМИ ММ, данный показатель увеличивался в обеих областях ЛДФ-метрии, возрастая прогрессивно к 10-м суткам исследования, когда его прирост достигал 51,76% ($p < 0,05$) в области ММ воздействия и 55,65% ($p < 0,05$) в интактной контрольной области. Возможно, увеличение амплитуды пульсовой волны на фоне снижения прессорных симпатических влияний и возрастающей эндотелиальной активности привело к суммарному приросту уровня перфузии в обеих областях ЛДФ-метрии при ММ воздействии.

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о том, что курсовое воздействие низкоинтенсивного ЭМИ ММ оказывает выраженное влияние на процессы микроциркуляции. К локальным изменениям тканевого кровотока, наблюдаемым при действии ЭМИ ММ, можно отнести снижение сократительной активности в области гладкомышечных прекапилляров, начиная с первого сеанса, а также увеличение функциональной активности эндотелия в течение первых семи сеансов ММ воздействия. В то же время снижение периферического сопротивления в области артериол и АВА, начиная с третьего сеанса ММ воздействия, увеличение функциональной активности микрососудистого эндотелия и рост пульсовой волны, регистрируемые во время десятого сеанса ММ воздействия, характеризовались системным проявлением.

Согласно литературным данным, ЭМИ ММ, наряду с другими образованиями, может таргетироваться микрососудами кожи, залегающих на глубине около 0,15 мм, в то время как максимум удельной поглощаемости зарегистрирован на глубине 0,7 мм [16–18]. Таким образом, микрососуды кожи вполне попадают под эффективный объем поглощения этим видом излучения. В.Н. Воронковым и соавторами [19] были зафиксированы морфологические сосудистые изменения в ответ на ММ воздействия при применении высоких интенсивностей ЭМИ (50 мВт/см²).

Так, при действии ММ излучения зарегистрировано возрастание уровня перфузии и увеличение глубины модуляции тканевого кровотока за счет вовлечения различных регуляторных компонентов. В частности, начиная с первого сеанса воздействия зарегистрированы реакции стороны миогенных осцилляций. Согласно литературным данным, миогенные осцилляции запускаются пейсмекерными гладкомышечными клетками преимущественно за счет осцилляторной активности Ca^{2+} [13]. В литературных источниках есть указания на экспериментальные данные касательно того, что в качестве сенсоров ММ излучения на частотах 42,2 ГГц (соответствуют длине волны 7,1 мм) рассматриваются осцилляции кальция [20, 21], и данный вид излучения вполне может модулировать их активность. Сле-

довательно, изменение миогенных осцилляций, наблюдаемое в области воздействия ММ волн, может быть обусловлено резонансным поглощением ММ излучения микрососудами кожи с частичным ингибированием кальциевого тока, что сопровождается расслаблением гладкомышечных клеток и, соответственно, вазорелаксацией.

Некоторые исследователи связывают прекапиллярную вазорелаксацию с «гистамино» подобной субстанцией [15]. Так, начальный этап каскада биологических реакции при ЭМИ ММ диапазона обусловлен дегрануляцией тучных клеток, причем содержание гистамина в зоне дегрануляции возрастает в 30 раз [22, 23].

Вовлеченность симпатических вазомоторов в реализацию механизмов действия ММ-излучения также продемонстрировано в настоящем исследовании. Отклик вегетативной нервной системы в ответ на воздействие ЭМИ ММ диапазона подтвержден в ряде работ [24, 25], где было показано смещение симпатовагусного равновесия в сторону ваготонии. Таким образом, снижение тонической симпатической импульсации под действием ММ волн в настоящем исследовании подтверждается и другими литературными данными и, вероятно, лежит в основе опосредованной нервными механизмами сосудистой модуляции.

Результаты настоящего исследования дают объяснение эффективному использованию ЭМИ КВЧ для лечения заболеваний, в патогенезе которых отмечаются выраженные нарушения процессов микроциркуляции.

Низкоинтенсивное миллиметровое излучение обладает значительным вазотропным эффектом. В механизмах действия низкоинтенсивного ЭМИ ММ на микроциркуляторные процессы основную роль играют микрососудистый эндотелий, изменение активности гладкомышечных клеток, а также изменение нервной регуляции тканевого кровотока.

Локальные (местные) изменения показателей тканевой микрогемодинамики под влиянием ММ излучения характеризовались постепенным изменением активности миоцитов (рост амплитуды миогенного компонента) и увеличением активности эндотелиального компонента (увеличение амплитуды эндотелиальных ритмов) во время первого сеанса, снижение адренергической активности (уменьшение амплитуды нейрогенных волн), начиная с третьего сеанса, рост пульсовой волны — в течение десятого сеанса ЭМИ ММ.

Системные изменения показателей микроциркуляции происходили на более поздних этапах курсового ММ-воздействия: изменение адренергического компонента регуляции, начиная с трехкратного воздействия, а эндотелиального контура регуляции и пульсовой волны — с десятого сеанса ЭМИ ММ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернух А.М., Александров П.Н., Алексеев О.В. *Микроциркуляция*. М.: Медицина; 1984.
2. Smith T., Wong-Gibbons D., Maultsby J. Microcirculatory effects of pulsed electromagnetic fields. *Orthop. Res.* 2004; 22: 80–4. [https://doi.org/10.1016/S0736-0266\(03\)00157-8](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(03)00157-8)
3. Крылов В.В. Биологические эффекты геомагнитной активности: наблюдения, эксперименты и возможные механизмы. *Труды ИБВ РАН*. 2018; 84(87): 7–38.
4. Франциянц Е.М., Шейко Е.А. Противоопухолевое действие электромагнитных полей и их влияние на боль в экспериментальной и клинической онкологии. *Исследования и практика в медицине*. 2019; 6 (2): 86–99.
5. Букатко В.Н., Данилова С.А. Лазерная доплеровская флоуметрия в изучении эффектов миллиметровой волновой терапии. *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. 2004; 4(36): 28–39.
6. Mayrovitz H., Grasclose E.E. Inspiration-induced vascular responses in finger dorsum skin. *Microvasc. Res.* 2002; 63: 227–32. <https://doi.org/10.1006/mvres.2001.2391>
7. Morris C., Skalak T. Static magnetic fields alter arteriolar tone in vivo. *Bioelectromagnetics*. 2005; 26: 1–9. <https://doi.org/10.1002/bem.20047>
8. Xu S., Okano H., Ohkubo C. Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation in anesthetized mice. *Bioelectrochemistry*. 2001; 53: 127–35. [https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(00\)00120-3](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(00)00120-3)
9. Паршина С.С. Современные данные о механизме действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона и его использования в кардиологии. *Эфферентная терапия*. 2005; 11(4): 39.
10. Киричук В.Ф., Майбородин А.В., Волин М.В. и др. Влияние электромагнитных КВЧ-колебаний на частотах молекулярных спектров излучения и поглощения оксида азота на функциональную активность тромбоцитов. *Цитология*. 2001; 8: 759–63.
11. Ichioka S., Minegishi M., Iwasaka M. et al. Skin temperature changes induced by strong static magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*. 2003; 24: 380–6. <https://doi.org/10.1002/bem.10115>
12. Крупаткин А.И., Сидорова В.В. *Функциональная диагностика состояния микроциркуляторно-тканевых систем: колебания, информация, нелинейность: рук-во для врачей*. М.: Ленанд, 2016.
13. Stefanovska A., Bracic M. Physics of the human cardiovascular system. *Contemporary Physics*. 1999; 40 (1): 31–5. <https://doi.org/10.1080/001075199181693>

14. Kvandal P., Stefanovska A., Veber M. et al. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis, and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. *Microvasc. Res.* 2003; 65 (3): 160–71.
15. Schmid-Schobein G.W., Grainger Neil D. *Molecular basis for microcirculatory Disorders*. Paris; 2003.
16. Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Миллиметровые волны низкой интенсивности в медицине и биологии. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2017; 12: 3.
17. Бецкий О.В., Креницкий А.П., Майбородин А.В. и др. Молекулярные HITRAN-спектры газов-метаболитов в терагерцевом и ИК-диапазонах частот и их применение в биомедицинских технологиях. *Биомедицинская радиоэлектроника*. 2007; 8–9: 89–93.
18. Бецкий О.В. Механизм воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биологические объекты (биофизический подход). *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. 1997; 5–6: 135–7.
19. Воронков В.Н., Хижняк Е.П. Морфологические изменения в коже при действии КВЧ ЭМИ. В кн.: «Миллиметровые волны не тепловой интенсивности в медицине: межд. симпоз.: сб. докл.». М.: ИРЭ АН СССР; 1991: 635–8.
20. Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. Действие непрерывного и модулированного ЭМИ КВЧ на клетки животных: Ч. 3. "Биологические эффекты непрерывного ЭМИ КВЧ". *Вестник новых медицинских технологий*. 2000; 7 (1): 20–5.
21. Гапеев А.Б., Чемерис Н.К. Действие непрерывного и модулированного ЭМИ КВЧ на клетки животных: обзор. Ч. I: Особенности и основные гипотезы о механизмах биологического действия ЭМИ КВЧ. *Вестник новых мед. технологий*. 1999; 6 (1): 15–22.
22. Попов В.И., Рогачевский В.В., Гапеев А.Б. Дегрануляция тучных клеток кожи под действием низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты. *Биофизика*. 2001; 46 (6): 1096–102.
23. Башаринов А.Е., Тучков Л.Г., Поляков В.М. и др. *Измерение радиотепловых и плазменных излучений в СВЧ-диапазоне*. М.: Советское радио; 1968.
24. Поповиченко Н.В. К вопросу о роли вегетативной нервной системы в реализации лечебных эффектов микроволновой терапии. В кн.: «Тез. докл. I Всесоюз. симпоз. «Фундаментальные и прикладные аспекты применения ММ излучения в медицине». Киев; 1989: 294.
25. Чужан Е.Н., Бирюкова Е.А., Раваева М.Ю. Изменение показателей функционального состояния человека под воздействием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ. *Физика живого*. 2008; 16 (1): 91–8.

REFERENCES

1. Chernush A.M., Aleksandrov P.N., Alekseev O.V. *Microcirculation*. M.: Medicine; 1984 (in Russian).
2. Smith T., Wong-Gibbons D., Maultsby J. Microcirculatory effects of pulsed electromagnetic fields. *Orthop. Res.* 2004; 22: 80–4. [https://doi.org/10.1016/S0736-0266\(03\)00157-8](https://doi.org/10.1016/S0736-0266(03)00157-8)
3. Krylov V. V. Biological effects of geomagnetic activity: observations, experiments and possible mechanisms. *Trudy IBVV RAN*. 2018; 84(87): 7–38 (in Russian).
4. Francijanc E.M., Shejko E.A. Antitumor effect of electromagnetic fields and their effect on pain in experimental and clinical oncology. *Issledovanija i praktika v medicine*. 2019; 6 (2): 86–99 (in Russian).
5. Bukatko V.N., Danilova S.A. Laser Doppler flowmetry in the study of the effects of millimeter wave therapy. *Millimetrovye volny v biologii i medicine*. 2004; 4(36): 28–39 (in Russian).
6. Mayrovitz H., Grasclose E.E. Inspiration-induced vascular responses in finger dorsum skin. *Microvasc. Res.* 2002; 63: 227–32. <https://doi.org/10.1006/mvre.2001.2391>
7. Morris C., Skalak T. Static magnetic fields alter arteriolar tone in vivo. *Bioelectromagnetics*. 2005; 26: 1–9. <https://doi.org/10.1002/bem.20047>
8. Xu S., Okano H., Ohkubo C. Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation in anesthetized mice. *Bioelectrochemistry*. 2001; 53: 127–35 [https://doi.org/10.1016/S0302-4598\(00\)00120-3](https://doi.org/10.1016/S0302-4598(00)00120-3)
9. Parshina S.S. Modern data on the mechanism of action of electromagnetic radiation of the millimeter range and its use in cardiology. *Jefferentnaja terapija*. 2005; 11 (4): 39 (in Russian).
10. Kirichuk V.F., Majborodin A.V., Volin M.V. et al. The effect of electromagnetic EHF oscillations at the frequencies of the molecular spectra of radiation and absorption of nitric oxide on the functional activity of platelets. *Citologija*. 2001; 8: 759–63 (in Russian).
11. Ichioka S., Minegishi M., Iwasaka M. et al. Skin temperature changes induced by strong static magnetic field exposure. *Bioelectromagnetics*. 2003; 24: 380–6. <https://doi.org/10.1002/bem.10115>
12. Krupatkin A.I., Cidorov V.V. *Functional diagnostics of the state of microcirculatory-tissue systems: fluctuations, information, non-linearity: manual for doctors*. M.: Lenand, 2016 (in Russian).
13. Stefanovska A., Bracic M. Physics of the human cardiovascular system. *Contemporary Physics*. 1999; 40 (1): 31–5 <https://doi.org/10.1080/001075199181693>
14. Kvandal P., Stefanovska A., Veber M. et al. Regulation of human cutaneous circulation evaluated by laser Doppler flowmetry, iontophoresis, and spectral analysis: importance of nitric oxide and prostaglandines. *Microvasc. Res.* 2003; 65 (3): 160–71.
15. Schmid-Schobein G.W. Grainger Neil D. *Molecular basis for microcirculatory Disorders*. Paris, 2003.
16. Бецкий О.В., Девятков Н.Д., Кислов В.В. Millimeter waves of low intensity in medicine and biology. *Uspeshi sovremennoj radioelektroniki*. 2017; 12: 3 (in Russian).
17. Beckij O.V., Krenickij A.P., Majborodin A.V. et al. Molecular HITRAN spectra of metabolite gases in the terahertz and IR frequency ranges and their application in biomedical technologies. *Biomedicinskaja radioelektronika*. 2007; 8–9: 89–93 (in Russian).
18. Beckij O.V. The mechanism of influence of low-intensity millimeter waves on biological objects (biophysical approach). *Millimetrovye volny v biologii i medicine*. 1997; 5–6: 135–7 (in Russian).
19. Voronkov V.N., Hizhnjak E.P. Morphological changes in the skin under the action of EHF EMP. In: *Non-thermal intensity millimeter waves in medicine: international symposium: collection of reports*. M.: IRJe AN SSSR; 1991: 635–8 (in Russian).
20. Gapeev A.B., Chemeris N.K. The effect of continuous and modulated EMR EHF on animal cells: Part 3. "Biological effects of continuous EHF EHF". *Vestnik novyh medicinskih tehnologij*. 2000; 7 (1): 20–5 (in Russian).
21. Gapeev A.B., Chemeris N.K. The effect of continuous and modulated EMR EHF on animal cells: a review. Part I: Features and main hypotheses about the mechanisms of the biological action of EHF EMR. *Vestnik novyh med. tehnologij*. 1999; 6 (1): 15–22 (in Russian).
22. Popov V.I., Rogachevskij V.V., Gapeev A.B. Degranulation of mast skin cells under the influence of low-intensity electromagnetic radiation of extremely high frequency. *Biophysics*. 2001; 46 (6): 1096–102 (in Russian).
23. Basharinov A.E., Tuchkov L.G., Poljakov V.M. et al. *Measurement of thermal and plasma radiation in the microwave range*. M.: Sovetskoe radio; 1968 (in Russian).
24. Popovichenko N.V. On the role of the autonomic nervous system in the implementation of the therapeutic effects of microwave therapy. In: «Abstracts of the I All-Union Symposium "Fundamental and Applied Aspects of the Application of MM Radiation in Medicine"». Kiev; 1989: 294 (in Russian).
25. Chuyan E.N., Birjukova E.A., Ravaeva M.Ju. Changes in the functional state of a person under the influence of low-intensity EHF EHF. *Fizika zhivogo*. 2008; 16 (1): 91–8 (in Russian).