

УДК 616-092.9: 612.135+616-001

DOI 10.29039/2413-1725-2025-11-4-100-108

ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ КРАЙНЕ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ МИКРОЦИРКУЛЯЦИИ В МОДЕЛИ ОСТРОЙ КОЖНОЙ РАНЫ У КРЫС

Джелдубаева Э. Р., Ярмолюк Н. С., Туманянц К. Н., Борисенко Д. А., Ковальчук И. О.

*ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им. В. И. Вернадского», Симферополь,
Республика Крым, Российская Федерация
E-mail: delviza@mail.ru*

Показано влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ КВЧ) (0,1 мВт/см², 42,3 ГГц) на показатели микроциркуляции в модели острой кожной раны у крыс. Выявлено, что низкоинтенсивное КВЧ-воздействие способствует умеренному повышению перфузии на разных этапах ранозаживления, снижению эндотелиальной и миогенной активности и более ранней стабилизации микроциркуляторной регуляции по сравнению с контролем. Выявленные изменения свидетельствуют об ускоренном переходе от воспалительной фазы к пролиферативно-ремоделирующей и позволяют рассматривать КВЧ-воздействие как перспективный метод в комплексной терапии ран.

Ключевые слова: низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ, микроциркуляция, лазерная доплеровская флоуметрия, острая кожная рана, регенерация.

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление микроциркуляторного русла играет ключевую роль в процессах заживления ран, особенно на ранних этапах регенерации. Так, микроциркуляция обеспечивает приток кислорода и питательных веществ, а также удаление продуктов обмена и токсинов. Нарушения микроциркуляции замедляют эпителизацию и способствуют хроническому течению раневого процесса [1].

Современные биофизические технологии рассматриваются как перспективный инструмент модуляции регенеративных процессов. Воздействие электромагнитного излучения (ЭМИ) различных диапазонов продемонстрировало способность улучшать микроциркуляцию, стимулировать ангиогенез, усиливать тканевую перфузию и ускорять заживление ран в доклинических моделях [2, 3]. Доказано, что электромагнитное воздействие может увеличивать насыщение тканей кислородом и активировать эндотелиальную функцию, что формирует благоприятные условия для восстановления повреждённых тканей [4].

Особый интерес представляют крайне высокие частоты (КВЧ), которые обладают выраженными биорегуляторными свойствами при минимальной термической нагрузке [5]. Несмотря на растущий интерес к КВЧ-терапии и отдельные данные о её положительном воздействии на микроциркуляцию и

метаболизм тканей, влияние низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на гемодинамику и микроциркуляторные механизмы в условиях острой раны остаётся недостаточно изученным и требует дополнительного экспериментального обоснования.

В связи с вышеизложенным целью данной работы явилось выявление изменений показателей микроциркуляции крыс при воздействии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ в модели острой раны.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследование проводилось на базе Центра коллективного пользования научным оборудованием «Экспериментальная физиология и биофизика» при кафедре физиологии человека и животных и биофизики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского» в рамках выполнения НИР № АААА-А21-121011990099-6.

Эксперимент проводили на 20 половозрелых крысах-самцах линии Wistar массой 250–300 г, содержащихся согласно требованиям ГОСТ 33216-2014 и нормативным рекомендациям по уходу за лабораторными животными. При выполнении исследований строго соблюдались требования законодательства Российской Федерации, биоэтические стандарты, а также нормативные акты, включая ГОСТ 31887-2012 «Принципы надлежащей лабораторной практики (GLP)». Каждая манипуляция с участием животных осуществлялась в строгом соответствии с разработанными и утверждёнными стандартными операционными процедурами, одобрены локальным комитетом по биоэтике ФГАОУ ВО «КФУ им. В. И. Вернадского» (протокол № 5, 2022 г.).

Животные были разделены на 2 группы по 10 особей в каждой. Всем крысам наносили продольный кожный разрез длиной 3 см в области холки с формированием шинированного полнослойного дефекта по методике Masson-Meyers и соавт. [6].

Первая группа животных представляла собой биологический контроль (К) и содержалась в течение 14 дней в стандартных условиях и вивария. Вторая экспериментальная группа крыс (КВЧ) подвергалась воздействию низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ с помощью аппарата «КВЧ. РАМЕД-ЭКСПЕРТ – 01» (Центр радиофизических методов диагностики и терапии «РАМЕД» Института технической механики НАНУ, г. Днепропетровск), применяя длину волны 7,1 мм (частота излучения – 42,3 ГГц) и плотность потока мощности – 0,1 мВт/см². Воздействие осуществлялось с экспозицией по 30 минут на затылочно-воротниковую область [7], ежедневно в течение 14 суток наблюдения в утренние часы.

Реакции микрососудистого эндотелия исследовали с помощью анализатора микроциркуляции крови «ЛАКК-02» и прибора для проведения функциональных проб «ЛАКК-ТЕСТ» (Россия, «Лазма») [5] с использованием программы LDF 2.20.0.507WL. Оптоволоконный зонд прибора «ЛАКК-02» фиксировали тканевым пластырем у непосредственного края раны (рис. 1). Измерения выполнялись на 1-е, 3-е, 7-е и 14-е сутки эксперимента для оценки динамики восстановления кровотока в зоне повреждения.



Рис. 1. Оценка состояния микроциркуляции.

В качестве параметров, анализируемых методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), регистрировали неосцилляторные показатели базального кровотока: показатель перфузии (ПМ, перф. ед.), среднее квадратичное отклонение (флак, СКО, перф. ед.), коэффициент вариации (КВ, %), а также осцилляторные компоненты микроциркуляции – амплитуду эндотелиальных (Аэ, перф. ед.), нейрогенных (Ан, перф. ед.), миогенных (Ам, перф. ед.), дыхательных (Ад, перф. ед.) и сердечных (Ас, перф. ед.) колебаний. Дополнительно рассчитывали интегральный показатель – индекс эффективности микроциркуляции (ИЭМ, усл. ед.). [8]. С помощью вейвлет-анализа ЛДФ-сигнала определяли амплитуды колебаний кровотока разных частотных диапазонов. [9, 10].

Статистический анализ данных проводили в GraphPad Prism 8 и MS Excel 2010. Проверка нормальности распределения осуществлялась по критерию Шапиро-Уилка. Сравнение между группами проводили с использованием критерия Краскела-Уоллиса с апостериорным тестом Данна. Уровень статистической значимости установлен на уровне $p < 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования показали статистически значимые изменения показателей микроциркуляции (МЦ) в группе крыс, подвергнутых воздействию низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ по сравнению с контрольной группой.

У животных первой группы (К) в разные сутки наблюдения регенерация раны соответствует физиологической модели заживления ран. Так, в 1-е сутки показатель перфузии (ПМ) составил 17,61 (15,83;20,59) перф. ед., показания Аэ, Ан, Ам, Ад, Ас были повышены. Индекс эффективности МЦ (ИЭМ) низкий (0,72 (0,70;0,87) у.е.). Это соответствует показателям при остром повреждении – расширение артериол, увеличение притока крови, повышение проницаемости капилляров, развитие отёка и гиперемии.

На 3-и сутки эксперимента у животных в контроле отмечается развитие ранней пролиферативной фазы. ПМ – 16,54 (16,26;16,63) перф. ед. Сосудистая реакция

начинает стабилизироваться. Меньший СКО (0,80 (0,63;0,86) перф.ед) при большем КВ (5,23 (3,83;5,28) %) говорит о более динамичном перераспределении кровотока. Отмечается увеличение ИЭМ более чем в 2 раза по сравнению с первыми сутками наблюдения, что показывает переход к фазе пролиферации.

На 7-е сутки отмечается пик пролиферации, формирование грануляционной ткани. Показатель перфузии 12,58 перф. ед. (11,59;15,92) (снижение на 24 % относительно третьих суток) отражает окончание активного воспаления, начало работы новообразованных капилляров, уменьшение артериовенозного шунтирования. Снижение большинства ритмов (Аэ, Ан, Ам) показывает уменьшение вазомоторной активности.

На 14-е сутки отмечается поздняя пролиферация, начало ремоделирования раны. ПМ увеличился на 16 % относительно седьмых суток, большинство ритмов (Аэ, Ан, Ам, Ас) повышены, но без признаков воспалительной гиперреакции. Это указывает на стабилизацию сосудистой регуляции, тонкую настройку трофики и метаболизма тканей, тенденцию к нормализации после заживления.

Полученные результаты динамики показателей МЦ соответствуют классическому течению фаз раневого процесса, описанному в экспериментальных и клинических работах по физиологии заживления ран [11].

Таким образом, динамика МЦ у животных в первой группе полностью согласуется с классической моделью раневого процесса.

У животных второй группы, подвергнутых воздействию низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ на первые сутки регистрации показатели МЦ статистически не отличались от соответствующих показателей у животных в контрольной группе.

На третьи сутки эксперимента у животных второй группы (КВЧ) отмечена тенденция к повышению показателя перфузии (ПМ) на 5,11 %, а также тенденция к уменьшению показателей вариабельности (СКО – на 13,13 %, КВ – на 21,70 %) относительно значений в контрольной группе. Амплитуды ритмов во всех диапазонах у крыс в группе КВЧ были выше контроля. Так, Аэ увеличилась на 30,35 %, Ан – на 15,84 %, Ам – на 36,84 % ($p<0,05$), Ад – на 30,99 %, Ас – на 59,16 % ($p<0,05$) относительно соответствующих данных в контроле (К). То есть отмечается выраженный рост миогенного и пульсового компонентов. Индекс эффективности МЦ (ИЭМ) у животных второй группы увеличился на 44,14 % ($p<0,05$) по сравнению с контролем (рис. 2).

На седьмые сутки эксперимента ПМ у крыс второй группы увеличился на 18,20 % ($p<0,05$) относительно контрольной группы. Показатели вариабельности незначительно уменьшились (СКО – на 21,94 % ($p<0,05$), КВ – на 18,50 %) по сравнению с данными в контроле. ИЭМ уменьшился на 71,31 % ($p<0,05$) относительно контрольных значений. Аэ уменьшилась на 62,17 % ($p<0,05$), Ан – на 30,19 % ($p<0,05$), Ам – на 40,89 % ($p<0,05$), Ад – на 11,09 % ($p<0,05$), Ас увеличилась на 95,91 % ($p<0,05$) относительно соответствующих данных у животных в контроле (см. рис. 2). Снижение эндотелиальных и миогенных колебаний под влиянием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ свидетельствует об уменьшении воспалительной активности и более спокойном тоне микрососудов, а

увеличение пульсового компонента показывает усиление вклада системной гемодинамики и сердечного выброса в обеспечение тканевого кровотока.

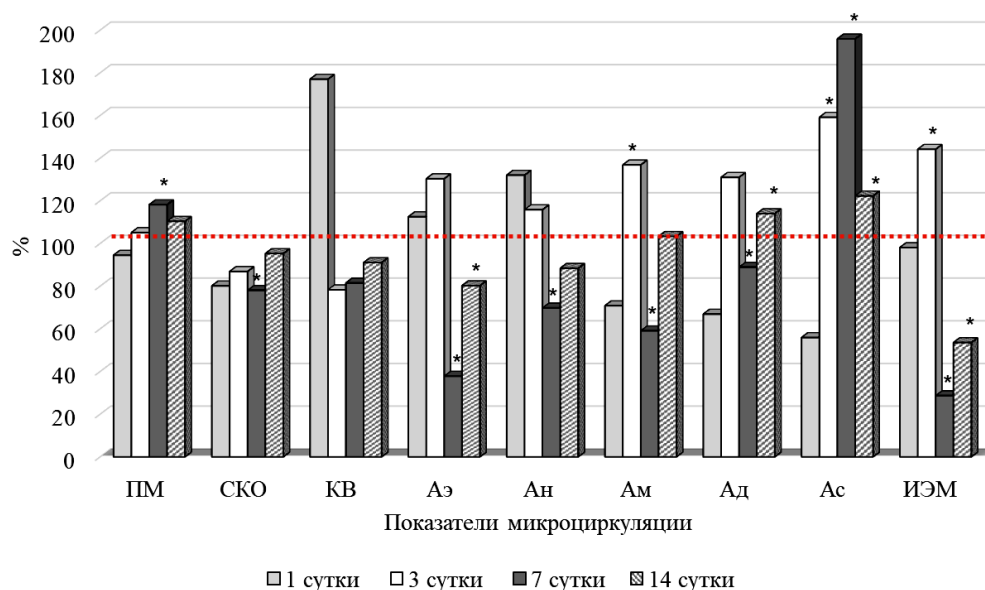


Рис. 2. Изменение показателей микроциркуляции у крыс, подвергнутых воздействию низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты (ЭМИ) на 1, 3, 7, 14 сутки регенерации острой раны (относительно показателей в контрольной группе животных, принятых за 100 %)

Примечание: показатель перфузии (ПМ), среднее квадратичное отклонение (СКО), коэффициент вариации (КВ), амплитуды эндотелиальных (Аэ), нейрогенных (Ан), миогенных (Ам), дыхательных (Ад) и сердечных (Ас) колебаний, индекс эффективности микроциркуляции (ИЭМ); достоверность различий между экспериментальными группами животных по критерию Данна.

На четырнадцатые сутки эксперимента у животных второй группы отмечается увеличение ПМ на 10,41 % по сравнению с контролем. Амплитуда эндотелиальной активности (Аэ) остаётся ниже контроля (на 19,75 %; $p < 0,05$), что свидетельствует об окончании активной фазы воспаления и васкулярного ремоделирования. Амплитуда пульсового компонента (Ас) была немного выше контроля (на 22,29 %, $p < 0,05$), т.е. сохраняется тенденция к чуть более интенсивному кровотоку. ИЭМ был ниже контроля на 46,43 % ($p < 0,05$) (см. рис. 2).

Полученные результаты согласуются с литературными данными. Так в работе Е. Н. Чуян и соавт. [5] показано, что при воздействии низкоинтенсивного ЭМИ мм-диапазона на кожу уже с первых сеансов отмечаются изменения эндотелиальной и миогенной осцилляторной активности, снижение периферического сопротивления и локальная перестройка микрогемодинамики. В работе R. Jiang и др. [12] по миллиметровой терапии подчёркивается способность КВЧ-излучения модулировать эндотелий, NO-сигнализацию и сосудистый тонус, что приводит к улучшению

тканевой перфузии и уменьшению воспаления. В исследовании Saliev T. и соавт. [13] показано, что электромагнитные поля разных диапазонов могут модулировать воспаление, пролиферацию, ангиогенез, NO-сигнализацию и цитокины, способствуя более физиологичному завершению раневого процесса. К процессам, на которые влияет ЭМП, относятся, в частности, миграция и пролиферация клеток, экспрессия факторов роста, передача сигналов оксида азота, модуляция цитокинов и многое другое. Gualdi G. и соавт. в обзоре [14] подчёркивают, что ЭМИ при ранозаживлении снижают избыточное воспаление, стимулируют неоангиогенез и ускоряют переход к фазе ремоделирования, при этом в конечном итоге нормализуют МЦ, а не поддерживают хроническую гиперемию. Вместе с тем, полученные данные в нашем исследовании не только подтверждают известные механизмы КВЧ-терапии, но и значительно расширяют их, демонстрируя конкретные микроциркуляторные эффекты в модели острой раны,

Таким образом, у животных второй группы под воздействием низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ отмечается более раннее включение к перестройке регуляции микрососудистого русла. Отмечается умеренное повышение перфузии на ключевых этапах заживления (3–14 сутки), а также снижение избыточной регуляторной нагрузки в поздние сроки (7–14 сутки). Это свидетельствует об ускорении регенерации раны, так как фазы пролиферации и ремоделирования проходят на фоне более благоприятной микроциркуляции. Полученные данные показывают, что низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ модулирует эндотелиальный и миогенный уровни регуляции сосудистого тонуса, снижает степень воспалительной вазодилатации и способствует более раннему переходу локального кровотока к пролиферативно-ремоделирующему типу, что создаёт оптимальные условия для репарации тканей.

Полученные данные открывают перспективу использования низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ как дополнительного модулирующего фактора в комплексной терапии ран. Особенно значимой может быть роль КВЧ-терапии при хронических, медленно заживающих ранах, где нарушенная микроциркуляция является одним из ключевых патогенетических факторов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого исследования установлено, что воздействие низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ существенно изменяет динамику микроциркуляторных процессов в зоне острой кожной раны у крыс. У животных контрольной группы течение раневого процесса соответствовало классической модели воспаления, пролиферации и начала ремоделирования, что подтверждается характерными изменениями перфузии, вариабельности кровотока и осцилляторных компонентов микроциркуляции.

Воздействие ЭМИ КВЧ приводило к ранней модуляции микроциркуляции, проявлявшейся повышением перфузии и усилением вазомоторной активности на 3-и сутки эксперимента, что свидетельствует об ускоренной адаптации микрососудистого русла к условиям повреждения. На 7-е и 14-е сутки у животных группы КВЧ наблюдались признаки более экономной работы микрососудов и

стабилизации локального кровотока, уменьшение амплитуды эндотелиальных и миогенных колебаний по сравнению с контролем. Выявленные изменения указывают на ускоренный переход от воспалительной фазы к пролиферативной и более раннее включение механизмов сосудистого ремоделирования под влиянием КВЧ-воздействия. Это создаёт более благоприятные условия для регенеративных процессов и формирования функционально полноценных сосудистых структур в зоне раны.

Полученные результаты демонстрируют потенциальную терапевтическую значимость КВЧ-воздействия и позволяют рассматривать его как перспективный метод в комплексной терапии острых и хронических ран.

Работа выполнена на оборудовании ЦКП «Экспериментальная физиология и биофизика» в рамках инициативной темы № АААА-А21-121011990099-6 «Физиологические механизмы биологического действия факторов разной природы и интенсивности» ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского».

Список литературы

1. Tonnesen M. G. Angiogenesis in wound healing / M. G. Tonnesen, X. Feng, R. A. Clark // Journal of Investigative Dermatology Symposium Proceedings. – 2000. – Vol. 5, No 1. – P. 40–46.
2. Pilla A. A. Mechanisms and therapeutic applications of time-varying and static magnetic fields / A. A. Pilla // Critical Reviews in Biomedical Engineering. – 1998. – Vol. 26, No 1–2. – P. 71–113.
3. Pakhomov A. G. Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves / A. G. Pakhomov [et al.] // Bioelectromagnetics. – 1998. – Vol. 19, No 7. – P. 393–413.
4. Cheing G. L. Influence of electromagnetic fields on angiogenesis and wound healing / G. L. Cheing, J. W. Wan // Journal of Wound Care. – 2006. – Vol. 15, No 4. – P. 149–152.
5. Чуян Е. Н. Изменение кожной микроциркуляции в ответ на воздействие низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона / Е. Н. Чуян, Н. С. Трибрат, Э. Р. Джелдубаева // Медицина труда и промышленная экология. – 2020. – Т. 60, № 9. – С. 605–609.
6. Masson-Meyers D. S. Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment / D. S. Masson-Meyers, T. A. M. Andrade, G. F. Caetano [et al.] // International Journal of Experimental Pathology. – 2020. – Vol. 101, No 1–2. – P. 21–37.
7. Чуян Е. Н. Механизмы антиноцицептивного действия низкоинтенсивного миллиметрового излучения / Е. Н. Чуян, Э. Р. Джелдубаева. – Симферополь : ДИАЙПИ, 2006. – 458 с.
8. Крупаткин А. И. Лазерная доплеровская флоуметрия микроциркуляции крови : руководство для врачей / А. И. Крупаткин, В. В. Сидоров. – М. : Медицина, 2005. – 254 с.
9. Козлов В. И. Метод лазерной доплеровской флоуметрии / В. И. Козлов, Э. С. Мач, Ф. Б. Литвин [и др.] // Пособие для врачей. – 2001. – 22 с.
10. Hoffman U. The frequency histogram – A new method for the evaluation of Laser Doppler Flux Motion / U. Hoffman, A. Yanar, A. Bolinger // Microvascular Research. – 1990. – P. 293–301.
11. Ehrlich H. P. Effects of cortisone and vitamin A on wound healing / H. P. Ehrlich, T. K. Hunt // Annals of Surgery. – 1968. – Vol. 167, No 3. – P. 324–328.
12. Jing R. Advances in Millimeter-Wave Treatment and Its Biological Effects Development / R. Jing, Z. Jiang, X. Tang // International Journal of Molecular Sciences. – 2024. – Vol. 25, No 16. – Article 8638.
13. Saliev T. Therapeutic potential of electromagnetic fields for tissue engineering and wound healing / T. Saliev, Z. Mustapova, G. Kulsharova [et al.] // Cell Proliferation. – 2014. – Vol. 47, No 6. – P. 485–493.

14. Gualdi G. Wound repair and extremely low frequency–electromagnetic field: insight from in vitro study and potential clinical application / G. Gualdi, E. Costantini, M. Reale, P. Amerio // International Journal of Molecular Sciences. – 2021. – Vol. 22, No 9. – Article 5037.

EFFECT OF LOW-INTENSITY EXTREMELY HIGH-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC RADIATION ON MICROCIRCULATION PARAMETERS IN A RAT MODEL OF ACUTE SKIN WOUND

Dzheldubaeva E. R., Yarmolyuk N. S., Tumanyants K. N., Borisenko D. A., Kovalchuk I. O.

*V. I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation
E-mail: delviza@mail.ru*

This study presents an experimental assessment of the effects of low-intensity extremely high-frequency electromagnetic radiation (EHF EMR) (0.1 mW/cm²; 42.3 GHz) on microcirculatory parameters in a Wistar rat model of acute full-thickness skin wound. Microcirculation was evaluated using laser Doppler flowmetry (LDF) on days 1, 3, 7, and 14 after wound formation.

In the control group, the dynamics of microcirculation corresponded to the classical phases of the wound-healing process: initial hyperemia, followed by a 24 % decrease in perfusion by day 7, and stabilization of blood flow by day 14.

Exposure to EHF radiation induced early modulation of microcirculatory mechanisms. By day 3, perfusion increased, the cardiac (pulse-related) oscillation component rose by 59.16 %, the myogenic rhythm increased by 36.84 %, and endothelial activity increased by 30.35 % compared with control. The microcirculatory efficiency index (MEI) increased by 44.14 %, indicating accelerated adaptive restructuring of the microvascular bed.

By day 7, the intensity of inflammatory regulation decreased: endothelial oscillation amplitude decreased by 62.17 %, myogenic oscillations by 40.89 %, and neurogenic oscillations by 30.19 %, while the amplitude of cardiac oscillations increased by 95.91 % relative to control. Perfusion remained 18.20 % higher than control, indicating enhanced tissue blood supply during the active proliferative phase.

By day 14, further normalization of microcirculatory regulation was observed. The MEI in the EHF group was 46.43 % lower than in the control group, reflecting more economical and stable functioning of the microvascular network during the late wound-healing phase.

The findings demonstrate that EHF-EMR accelerates the transition from the inflammatory to the proliferative phase, optimizes the amplitude–frequency structure of microcirculatory oscillations, and promotes a more favorable microenvironment for tissue repair. These results indicate that low-intensity EHF-EMR may be considered a promising adjunct modality in the treatment of acute and chronic wounds.

Keywords: low-intensity EHF-EMR, microcirculation, laser Doppler flowmetry, acute skin wound, regeneration.

References

1. Tonnesen M. G., Feng X., Clark R. A., Angiogenesis in wound healing, *J. Invest. Dermatol. Symp. Proc.*, **5**, 40 (2000).
2. Pilla A. A., Mechanisms and therapeutic applications of time-varying and static magnetic fields, *Crit. Rev. Biomed. Eng.*, **26**, 71 (1998).
3. Pakhomov A. G., Akyel Y., Pakhomova O. N., Stuck B. E., Murphy M. R., Current state and implications of research on biological effects of millimeter waves, *Bioelectromagnetics*, **19**, 393 (1998).
4. Cheing G. L., Wan J. W., Influence of electromagnetic fields on angiogenesis and wound healing, *J. Wound Care*, **15**, 149 (2006).
5. Chuyan E. N., Tribat N. S., Dzheldubaeva E. R., Izmenenie kozhnoi mikrotsirkulyatsii v otvet na vozdeistvie nizkointensivnogo elektromagnitnogo izlucheniya millimetrovogo diapazona, *Med. Truda Prom. Ekol.*, **60**, 605 (2020).
6. Masson-Meyers D. S., Andrade T. A. M., Caetano G. F., Guimaraes F. R., Leite M. N., Leite S. N., Frade M. A. C., Experimental models and methods for cutaneous wound healing assessment, *Int. J. Exp. Pathol.*, **101**, 21 (2020).
7. Chuyan E. N., Dzheldubaeva E. R., *Mekhanizmy antinotsitseptivnogo deistviya nizkointensivnogo millimetrovogo izlucheniya*, 458 p. (DIAPI, Simferopol, 2006).
8. Krupatkin A. I., Sidorov V. V., *Laser Doppler flowmetry of microcirculation: handbook for physicians*, 254 p. (Meditsina, Moscow, 2005).
9. Kozlov V. I., Mach E. S., Litvin F. B., Terman O. A., Sidorov V. V., *Metod lazernoi dopplerovskoi floumetrii*, 22 p. (2001).
10. Hoffman U., Yanar A., Bolinger A., The frequency histogram: a new method for evaluation of Laser Doppler Flux Motion, *Microvasc. Res.*, 293 (1990).
11. Ehrlich H. P., Hunt T. K., Effects of cortisone and vitamin A on wound healing, *Ann. Surg.*, **167**, 324 (1968).
12. Jing R., Jiang Z., Tang X., Advances in millimeter-wave treatment and its biological effects development, *Int. J. Mol. Sci.*, **25**, 8638 (2024).
13. Saliev T., Mustapova Z., Kulsharova G., Bulanin D., Mikhlovsky S., Therapeutic potential of electromagnetic fields for tissue engineering and wound healing, *Cell Prolif.*, **47**, 485 (2014).
14. Gualdi G., Costantini E., Reale M., Amerio P., Wound repair and extremely low frequency–electromagnetic field: insight from in vitro study and potential clinical application, *Int. J. Mol. Sci.*, **22**, 5037 (2021).