

Влияние электромагнитных излучений различного диапазона на процессы микроциркуляции

Кафедра физиологии человека и животных и биофизики Таврического национального университета им. В. И. Вернадского; Центр коррекции функционального состояния человека, Симферополь, Украина
e-mail: tribratnatalia@rambler.ru

Реферат

Приведены результаты последних исследований, посвященных изучению влияния электромагнитных полей различных диапазонов на процессы микроциркуляции. Среди исследуемых процессов в рамках системы микроциркуляции при действии электромагнитных полей рассматривали проницаемость гематоэнцефалического барьера, функциональные свойства клеток крови, сосудодвигательные реакции и, соответственно, интенсивность потока крови. Выявлена неоднозначность эффектов действия электромагнитных излучений на процессы микрогемодинамики. Обсуждены вероятные причины разноречивости полученных экспериментальных данных. Показано, что величина биологического эффекта связана с параметрами электромагнитного поля, а именно — с частотой, а соответственно, и длиной волны, работой в импульсном или непрерывном режимах, частотой модуляции, экспозицией, кратностью сеансов воздействия. Кроме того, биологическая эффективность может определяться и особенностями ткани, на которую осуществляется воздействие, исходным функциональным состоянием исследуемого объекта. Особое внимание уделено электромагнитным факторам низких интенсивностей, обладающих выраженной биологической активностью. Приведены предполагаемые механизмы действия электромагнитных полей различных диапазонов на процессы микроциркуляции.

Ключевые слова: электромагнитные излучения, микроциркуляция крови.

Tribrat N. S., Chuyan E. N., Ravaeva M. Yu.

Influence electromagnetic radiation different ranges on processes of microcirculation

Tavrida national V. Vernadsky university; Center of a person functional condition correction, Ukraine, Simferopol
e-mail: tribratnatalia@rambler.ru

Abstract

The results of recent researches for the study of influence of electromagnetic fields of different ranges on the processes of microcirculation are observed. Among the analyzed processes within the framework of microcirculations system under the influence of electromagnetic fields were considering: the permeability of blood-brain barrier, functional properties of blood cells, vasomotor reactions, and, the level of blood flow. The effects ambiguity of electromagnetic radiation's influence on the microhemodynamics processes was revealed. The article discussed the probable causes of contradictions in the experimental data. It is shown that quantity of biological effects associated with the parameters of the electromagnetic field, namely with the frequency and the wavelength, the work in pulsed or continuous mode, modulation frequency, exposure, the multiplicity of sessions of exposure. In addition, the biological effectiveness can be determined by the characteristics of tissue, which were under the impact, and by the initial functional state of the object. Particular attention was given to electromagnetic factors of low intensity, with pronounced biological activity. The expected mechanisms of action of electromagnetic fields of different ranges on the processes of microcirculation are given.

Keywords: electromagnetic radiation, microcirculation.

В настоящее время к изучению вопросов системы микроциркуляции крови, а также к проблемам влияния на процессы микрогемодинамики факторов различной природы и интенсивности проявляется большой интерес. Это обусловлено тем, что система микроциркуляции крови принимает непосредственное участие в поддержании местного гомеостаза, обеспечении оптимального функционирования тканей и органов, как в норме, так и при патологии, и в связи с этим может являться одним из основных звеньев в цепи ответных реакций организма на действие различных факторов. Среди таких факторов наиболее интенсивно изучаются электромагнитные излучения (ЭМИ) различных диапазонов, поскольку известно, что они обладают выраженной биологической активностью, а эффекты их действия могут быть обусловлены, в том числе, и изменением функционального состояния системы микроциркуляции крови.

Предпринималось множество попыток исследовать изменения параметров микрогемодинамики, когда ткань и/или кровеносные сосуды подвергались экспериментальному влиянию ЭМИ [44–58, 64–74, 87–106, 108–110]. Такие экспериментальные данные имеют важное значение, поскольку могут привести свой вклад в более глубокое понимание механизмов действия ЭМИ на процессы микроциркуляции и, соответственно, на течение многих процессов в целом организме. Следовательно, выявление закономерностей действия ЭМИ на периферическое кровообращение должно послужить основой эффективного применения этого физического фактора для профилактики и лечения функциональных и органических нарушений различного генеза.

Несмотря на многочисленные исследования, изучающие действие ЭМИ на тканевой кровоток, до сих пор нет единого мнения по этому вопросу. Так, некоторые авторы указывают на то, что действие ЭМИ приводит к вазорелаксации [97, 100] и увеличению потока крови [47, 54, 109, 110], другие источники сообщают, что ЭМИ оказывают, напротив, вазоконстрикторное действие [43, 103] и ведут к снижению потока крови [52, 53], третьи констатируют отсутствие эффекта ЭМИ [64–65, 70–71, 108]. Следовательно, необходимо исследовать возможные причины этих противоречий. Поэтому целью данной работы является систематизация существующих данных и выявление закономерностей действия ЭМИ на микроциркуляторные процессы.

В настоящее время под объектив исследователей попадают важнейшие функции системы микроциркуляции, к которым относят, во-первых, стабилизацию кровяного давления при развитии местных регуляторных приспособлений [74, 85, 86, 93, 107], что требует изучения влияния ЭМИ на кровяное давление. Однако давление крови невозможно изучать без рассмотрения динамики потока крови, поэтому немалая толика исследований посвящена изучению сосудодвигательных функций ЭМИ [73, 78–80].

Во-вторых, микроциркуляторная система призвана обеспечивать гематотканевой обмен, согласно

изменяющимся метаболическим потребностям тканей, следовательно, необходимо также рассматривать возможность действия ЭМИ и на этот аспект [61, 64, 65, 87, 88, 90].

Поскольку в системе микроциркуляции кровь представлена в виде гетерогенной системы, следовательно, клетки крови и их взаимоотношения с сосудистой стенкой также могут модулировать микроциркуляторные процессы. Наряду с этим, ЭМИ, оказывая влияние на клетки крови, могут опосредовать через них свое действие на микрогемодинамику [104–106].

Известно, что характер взаимодействия электромагнитной волны с биологическими объектами во многом определяется параметрами излучения: частотой или длиной волны, скоростью распространения, когерентностью колебаний, работой в импульсном или непрерывном режиме, частотой модуляции, поляризацией волны. Поэтому естественно, что при сравнении данных о действии ЭМИ на процессы микроциркуляции эти показатели должны учитываться.

Влияние постоянных магнитных полей на процессы микроциркуляции

Большинство исследований, посвященных изучению влияния ЭМИ на периферическое кровообращение, связано с действием статических или постоянных магнитных полей (ПМП).

S. Xu et al. [110] выявили пороговый эффект действия ПМП. В частности, было показано, что порогом действия ПМП, вызывающего изменения в микрогемодинамике, является индукция 1 мТл. После 10-минутного воздействия на область большеберцовой кости анестезированных мышей наблюдалось увеличение перфузии на 20–45 %. Вероятно, именно этим можно объяснить отсутствие эффекта при воздействии ПМП с магнитной индукцией 0,1 мТл на кожный капиллярный кровоток человека [68] и 0,3 мТл [109] на микрососуды большеберцовой области крыс, поскольку такие интенсивности являются подпороговыми.

Некоторые исследователи обнаружили, что ПМП способствуют увеличению потока крови. Так, при действии ПМП 10 мТл скорость кровотока в большеберцовой кости крыс увеличивалась на 15 % во время воздействия и на 45 % после окончания воздействия [109]. В исследовании кровотока сосудов ушной раковины кроликов, предварительно подвергавшихся обезболиванию, при действии ПМП индукцией 0,25 Тл в течение 40 минут методом микрофотоэлектрической плетизмографии зарегистрировано увеличение потока крови на 20–40 %, начиная с 10-й минуты воздействия [45]. Несколько позже вазодилатирующий эффект был подтвержден для ПМП индукцией 0,35 Тл в результате увеличения чувствительности барорецепторов, модулирующих периферическую гемодинамику [46]. Увеличение потока крови также было зафиксировано для ПМП 180 мТл при непрерывном воздействии на протяжении 4-х недель на кожный кровоток сосудов ушной раковины предварительно анестезированных кро-

ликов [110]. Аналогичные результаты были получены при воздействии ПМП 8 Тл с экспозицией 20 минут на микрокровоток кожной складки дорсальной поверхности туловища крыс, предварительно подвергнутых обезболиванию. Однако в последнем случае увеличение кровотока было очень кратковременным — в течение 5 минут после воздействия ПМП — и, по мнению авторов [51], явилось компенсаторной реакцией на снижение кровотока, зарегистрированное во время облучения.

Ряд исследований, наоборот, указывают на снижение интенсивности кровотока при действии ПМП [52, 53]. Так, 45-минутное воздействие ПМП 400 мТл на тканевую кровотока человека, исследуемый методом лазерной доплеровской флоуметрии (ЛДФ), способствовало снижению его интенсивности. S. Ichioka [52], изучая воздействие ПМП высоких интенсивностей, исследовал действие ПМП 8 Тл на периферическую гемодинамику в микрососудах кожи спины крыс методом витальной микроскопии. Было показано, что при действии ПМП наблюдалось угнетение кожной микроциркуляции как при 5-минутной [53], так и при 20-минутной экспозиции [52]. Наряду со снижением потока крови, было зарегистрировано и снижение температуры тела, что, по мнению авторов, явилось причиной применения анестезии. Кроме того, ПМП 8 Тл вызывало испарение влаги с поверхности тела, что также могло быть причиной снижения температуры во время воздействия. Однако в другом исследовании на грызунах было показано, что действие ПМП 1,5 Тл с градиентом 60 м^{-1} в течение 3-х часов не изменяло температуру тела [101].

Некоторые авторы указывают на отсутствие сосудодвигательных реакций при действии ПМП. Так, воздействие ПМП как с низкой индукцией 50 мТл в течение 15 минут [49] и 60 мТл в течение 1 часа [60], так и высокой индукцией 8 Тл, на протяжении 1 часа у человека [56] не изменяло параметров кровяного давления. Изменения в интенсивности потока крови также не были зарегистрированы при действии ПМП индукцией 27 мТл в течение 48 часов [99], 20-минутной экспозиции 85 мТл [67] полчасового воздействия 80 мТл [63] и 100 мТл на протяжении 36 минут [68]. По мнению некоторых авторов [68, 73], отсутствие эффекта при действии ПМП, вероятно, связано с тем, что воздействие проводилось на здоровых испытуемых с нормальным сосудистым тонусом.

Выявлена обратно пропорциональная зависимость между геомагнитной активностью и сосудодвигательными реакциями со стороны капиллярного русла. В частности, J. Gmitrov (2005) методом микрофотоэлектрической плетизмографии выявил, что у кроликов в дни интенсивной геомагнитной активности происходило снижение чувствительности барорецепторов и, как следствие, интенсивности тканевого кровотока.

Вопрос о влиянии полюса магнита (0,4 Тл на вентральной поверхности пальца, 87,9 мТл на дорсальной стороне пальца) на кожную гемодинамику изучали Н. Mayarovitz и Е. Groseclose [68], в исследова-

ниях которых было показано, что полярность магнита не оказывает влияния на гемодинамический эффект.

В некоторых исследованиях показано, что эффекты действия ПМП зависят не только от параметров поля, а во многом могут определяться свойствами биологического объекта. В частности, Н. Okano и С. Ohkubo было проведено несколько серий экспериментов с применением различных параметров ПМП, результаты которых свидетельствуют о том, что направленность сосудодвигательной реакции определяется исходным состоянием сосудистого тонуса [78–80, 82–84]. Также методом микрофотоэлектрической плетизмографии было выявлено, что ПМП (1,5 и 10 мТл) [47, 76] способствовало нормализации тонуса сосудов ушной раковины кролика, приводя к его увеличению в случае исходно сниженного тонуса и, наоборот, к снижению в случае первоначально повышенного. Аналогичные изменения были зафиксированы и при более высоких значениях индукции ПМП (70 мТл) в области микрососудов скелетных мышц крыс методом витальной микроскопии [66].

Разнонаправленное действие ПМП обнаружено и в экспериментальных работах с применением препаратов, оказывающих действие на сосудистый тонус, методами витальной микроскопии и окклюзионной плетизмографии. Так, при экспериментальном моделировании высокого микрососудистого тонуса у кроликов введение вазоконстрикторов (норадреналина или ингибитора NO-синтазы) ПМП 1 мТл вызывало расширение сосудов и, как следствие, увеличение потока крови и снижение давления, в то время как при введении вазодилаторов, в частности, ацетилхолина или блокаторов кальциевых каналов, под действием ПМП тех же параметров наблюдалось сужение сосудов и увеличение кровяного давления и, соответственно, снижение потока крови [84].

Аналогичные изменения были зарегистрированы и в периферических сосудах ушной раковины [78] и в области шеи кроликов при введении норпинефрина, когда действие ПМП индукцией 5,5 мТл приводило к снижению давления крови, зарегистрированного методом микрофотоэлектрической плетизмографии. При таких же параметрах ПМП введение нитроглицерина (ингибитора кальциевых каналов) вызывало увеличение сосудистого тонуса в области шеи кроликов, в то время как в области таза при действии ПМП подобного эффекта не наблюдалось. Авторы отметили, что действие ПМП в области шеи способствует повышению чувствительности барорецепторов через 40–60 мин после воздействия.

Гомеостатическое действие ПМП было подтверждено и Н. Okano [81] в экспериментах с использованием резерпина, вызывающего гипотонию. Воздействие ПМП 25 мТл в течение 12 недель существенно сократило действие резерпина, нормализуя кровяное давление, в то время как ПМП 10 мТл не оказывало воздействия на периферический кровоток.

ОБЗОРЫ

Серия экспериментов, проведенная на крысах-гипертониках, также продемонстрировала гомеостатический эффект ПМП различных параметров, оказывающего гипотензивное действие [78–83]. Интересны результаты исследования, проведенного на крысах с наследственной гипертензией, подвергавшихся действию ПМП индукцией 10 и 25 мТл в течение 12 недель. Гормональный анализ выявил снижение уровня ангиотензина II и альдостерона до 65,3 и 39,6 % соответственно при действии ПМП 10 мТл; при 25 мТл наблюдалось снижение уровня ангиотензина II до 63,8 %, альдостерона — до 36,6% [79].

Некоторые литературные данные свидетельствуют о влиянии ПМП на транскапиллярный обмен, изучаемый на модели гематоэнцефалического барьера (ГЭБ). Так, было показано, что ПМП высоких интенсивностей увеличивало проницаемость ГЭБ. Например, воздействие ПМП 0,15 Тл, 23,2 минуты [95], ПМП 0,15 Тл двукратно по 23,2 минуты [88] и ПМП 1,5 Тл и 1,89 Тл двукратно по 22,5 минуты [87] приводило к значительному увеличению проницаемости ГЭБ.

Таким образом, большинство исследований, представленных в доступной, в основном зарубежной, литературе свидетельствуют о том, что действие ПМП в диапазоне от 1 мТл до 8 Тл длительно — от 10 минут до 12 недель оказывает влияние на различные аспекты микрогемодинамики, в частности, на кровяное давление, поток крови, особенности транскапиллярного обмена. Эффекты действия ПМП определяются как параметрами поля, причем максимальное модулирующее действие на сосудодвигательные функции оказывают умеренные интенсивности ПМП (высокие уровни интенсивности ПМП способствуют угнетению микроциркуляции и увеличению проницаемости ГЭБ), так и свойствами биологического объекта, в частности, исходным состоянием сосудистого тонуса. ПМП различных параметров оказывают гомеостатическое действие как на сосудодвигательные реакции, так и на поток крови. Возможно, именно с этим зачастую и связаны разнонаправленные реакции микроциркуляторных процессов на действие ПМП, зарегистрированные различными исследователями.

Влияние переменных электромагнитных полей на процессы микроциркуляции крови

Влияние ЭМИ экстремальнонизких, сверхнизких и низких частот на процессы микроциркуляции

Было предпринято несколько попыток исследовать действие ЭМИ экстремальнонизких, сверхнизких и низких частот (ЭНЧ, СНЧ, НЧ) на процессы микрогемодинамики. При этом большинство экспериментальных исследований свидетельствуют об отсутствии выраженных эффектов при действии ЭМИ указанных диапазонов на кровяное давление [54]. Так, методом ЛДФ не выявлено влияния на кожную микроциркуляцию и температуру кожи стопы человека при использовании сочетанного действия ЭНЧ высокоинтенсивного (10 Гц, 8,4 мТл) и низкоинтенсивного (30 Гц, 0,1 мТл) ЭМИ в течение

30 минут. Авторы предположили, что отсутствие эффекта, возможно, связано с кратковременным и однократным воздействием этого физического фактора [92]. При действии ЭМИ ЭНЧ (50 Гц, 96 мТл) также не было зарегистрировано изменения кровотока в мозге крыс [108].

В эксперименте с имплантированной в мозг крыс опухолью исследовали влияние ЭМИ ЭНЧ (50 Гц, 03 мТл и 3 мТл, курсовое воздействие в течение 18 дней) на процессы микроциркуляции. На 15-е сутки экспериментального воздействия ЭМИ зарегистрировано, что микроциркуляторные параметры, включая сосудистую плотность, средний диаметр сосудов, оставались неизменными при сравнении с группой плацебо [105].

Интересно, что ЭМИ ЭНЧ (225 мкТл, экспозиция 30 и 60 минут) не изменяют амплитудно-частотных параметров колебаний тканевого кровотока, измеренного методом ЛДФ с ацетилхолиновой пробой [71].

Некоторые экспериментальные данные демонстрируют наличие выраженных эффектов действия ЭМИ ЭНЧ на взаимодействие клеток крови с микроваскулярным эндотелием. Так, было показано, что однократное воздействие ЭМИ ЭНЧ (50 Гц, 30 мТл) приводит к значительному увеличению взаимодействия лейкоцитов с клетками эндотелия [104]. Аналогичные результаты получены у мышей при однократном и курсовом (в течение 15 дней) воздействии ЭМИ ЭНЧ (50 Гц) [105]. А. Ushiyama, С. Ohkubo показано, что пороговым уровнем для увеличения адгезии лейкоцитов к эндотелиальной выстилке для 50 Гц ЭМИ ЭНЧ при однократном воздействии составляет индукция 3 мТл, в то время как при курсовом воздействии — 1 мТл.

Изучению действия низкочастотного ЭМИ (32 и 48 мТл, 3,8 кГц) посвящено исследование S. Ueno [103], которым было описано снижение потока крови в коже человека, зарегистрированное методом ЛДФ. Автор предположил, что уменьшение потока крови, зафиксированное уже через 6–8 с после начала воздействия, обусловлено «защитной» вазоконстрикторной реакцией организма в ответ на действие ЭМИ и высказал мнение, что в механизмах действия магнитных полей на процессы микроциркуляции большая роль принадлежит нервной, в частности, кортико-гипоталамо-бульбарной системе.

Таким образом, в доступной литературе имеются сведения о том, что ЭМИ ЭНЧ не оказывают воздействия на сосудодвигательную функцию микрососудов. В то же время точкой приложения действия ЭМИ ЭНЧ, СНЧ и НЧ в системе микроциркуляции может быть функциональное состояние клеток крови, что позволяет рассматривать действие этого фактора в качестве вероятного триггера, модулирующего лейкоцитарно-эндотелиальные взаимодействия.

Влияние ЭМИ высокочастотного диапазона на процессы микроциркуляции

Большое количество исследований, проведенных в последние десятилетия, посвящено изучению ЭМИ высокочастотного диапазона (ВЧ) на процес-

сы микроциркуляции.

Существуют весьма разноречивые данные о влиянии ЭМИ ВЧ на микроциркуляторные процессы. Так, некоторые источники сообщают о том, что ЭМИ ВЧ способствует увеличению потока крови [94, 96], причем большинство из них было получено при тепловом воздействии ЭМИ ВЧ высокой интенсивности [55, 77, 86].

Однако показано, что нетепловое действие ЭМИ ВЧ также влияет на показатели тканевого кровотока и способствует изменению проницаемости ГЭБ [42, 92]. В частности, ЭМИ ВЧ (915 МГц) способствовало увеличению проницаемости сосудистой стенки для альбуминов в мозге у крыс [89]. Необходимо отметить, что воспроизвести цитируемые результаты многим исследователям не удалось [44, 61, 102], в связи с чем авторами было сделано заключение, что отсутствие эффекта, возможно, обусловлено низкими уровнями среднего удельного поглощения излучения тканями мозга (ниже 2,0 Вт/кг).

Большинство исследований, посвященных рассмотрению влияния ЭМИ ВЧ на сосудодвигательные реакции, выявили четкую зависимость вазодилаторного эффекта от времени и частоты воздействия. Так, M. Miura, J. Okada [72], подвергая область перепонки лягушки воздействию ЭМИ ВЧ разных параметров, выявили, что наибольшим вазодилаторным действием обладают ЭМИ с частотами в диапазоне от 10 до 100 МГц с частотой модуляции 10 кГц, при этом дилатация сосудов происходила медленно, выходя на плато через 60 минут.

Н. Mayarovitz и P. Larsen [70] описали эффекты действия ЭМИ ВЧ (27,12 МГц, 600 имп./с) на кожный кровоток человека. Методом ЛДФ было выявлено, что 45-минутное воздействие ЭМИ ВЧ увеличивает капиллярный кровоток в коже руки, находящейся под воздействием указанного фактора, на 29 %, в то время как кровоток в коже руки, не подвергавшейся действию поля, оставался без изменений. Позже [69] теми же авторами было показано, что при действии ЭМИ ВЧ (27,12 МГц, 600 имп./с, 0,1 мТл) капиллярный кровоток в большей степени увеличивался на участке кожи вокруг язвы у больных сахарным диабетом.

R. Huber [50] сообщил, что воздействие ЭМИ (900 МГц) с экспозицией 30 минут приводило к увеличению кровотока в мозге испытуемых, выявленного позитронно-эмиссионным сканированием. В то же время некоторые исследования сообщают о вазоконстрикторном эффекте действия ЭМИ ВЧ у людей при аналогичной частоте ЭМИ (900 МГц, 2 Вт) с экспозицией 35 минут, однако в данном случае применялась модуляция ЭМИ с частотой 217 Гц. По мнению авторов, такая ответная реакция на действие ЭМИ ВЧ обусловлена увеличением активности симпатических афферентов [43].

Наряду с этим, существуют данные [48], свидетельствующие об отсутствии влияния ЭМИ ВЧ (902 МГц, 217 Гц, экспозиция 45 минут) на регионарный церебральный кровоток испытуемых. Другие исследования также подтверждают отсутствие эффекта при длительном облучении биообъектов ЭМИ ВЧ.

В частности, проводилось изучение воздействия ЭМИ ВЧ 1,439 МГц и 1439 МГц на микрогемодинамику в мозге крыс с различными показателями коэффициента среднего удельного поглощения излучения тканями мозга — 0,6, 2,4 и 4,8 Вт/кг для острого воздействия в течение 10 минут и 2,4 Вт/кг для хронического экспериментального воздействия с экспозицией 1 час на протяжении 5 дней в течение 4 недель. Среди показателей микроциркуляции рассматривались скорость потока крови, диаметр сосудов, лейкоцитарная активность и функционирование ГЭБ. Методом интравитальной микроскопии было выявлено, что все указанные выше показатели микроциркуляции, исследуемые в этих экспериментах, не изменялись как при остром, так и при хроническом воздействии ЭМИ ВЧ [64–66].

Таким образом, данные о влиянии ЭМИ ВЧ на параметры микроциркуляции весьма неоднозначны. Влияние ЭМИ ВЧ на проницаемость ГЭБ в значительной степени определяется интенсивностью действующего поля. В то же время зависимость эффекта действия ЭМИ на сосудодвигательную активность от параметров поля не является столь определенной, приводя к различным вазоактивным реакциям при сходных частотных параметрах, поэтому требует дальнейшего изучения.

Влияние ЭМИ сверхвысокочастотного и крайне-высокочастотного диапазонов на процессы микроциркуляции крови

ЭМИ сверхвысокочастотного (СВЧ) и крайне-высокочастотного (КВЧ) диапазонов в настоящее время широко применяется в медицинской практике для лечения различных заболеваний, в патогенезе которых, в том числе, присутствуют и изменения процессов микроциркуляции.

Исследованиям эффектов влияния ЭМИ СВЧ и КВЧ диапазонов на систему микроциркуляции крови посвящены в основном клинические исследования. В частности, ответная реакция со стороны сосудов на действие дециметрового (ДМВ)–воздействия заключалась в увеличении кровотока за счет расширения сосудов и сопровождалось повышением капиллярного давления, проницаемости сосудов и, как следствие, интенсификацией обмена веществ [20, 41] и усилением регенерации поврежденных тканей [19, 35].

Представлены результаты изменения гемодинамических показателей у больных гипертонической болезнью в процессе ДМВ-терапии с воздействием на воротниковую область и область проекции почек [18, 28] и сделан вывод о гипотензивном действии изучавшегося фактора.

В работе Е. И. Сорокиной [35] было показано улучшение периферического кровообращения по результатам капилляроскопии и реовазографии при воздействии ДМВ на грудной отдел позвоночника у больных остеохондрозом и стабильной стенокардией.

Экспериментальными исследованиями на крысах с моделированным инфарктом миокарда показано, что ДМВ-воздействие на область сердца

ОБЗОРЫ

повышает кровенаполнение сосудов микроциркуляторного русла миокарда и скорость кровотока в них, увеличивает количество функционирующих сосудов [19].

Отчетливо проявилась однонаправленность вазодилатирующих реакций при воздействии ДМВ разной локализации: на область сердца и рефлекторно-сегментарную зону Cv–Thiv, что свидетельствует не о местном, а о генерализованном характере ответной реакции всего организма. Генерализованная вазодилатация, вызванная ДМВ, по-видимому, является одним из механизмов снижения периферического сосудистого сопротивления, обычно компенсаторно повышенного при сердечной недостаточности даже в начальных стадиях [29]. По мнению авторов, определенная роль в перестройке периферической и регионарной гемодинамики под влиянием воздействий ДМВ принадлежит изменениям вегетативной регуляции — ослаблению симпатических влияний и усилению парасимпатических, приводя к снижению сосудистого тонуса.

Применение в медицинской практике ЭМИ сантиметрового диапазона приводит к усилению регионарной гемо- и лимфодинамики за счет увеличения скорости кровотока, количества функционирующих капилляров и расширения микрососудов [7].

Расстройства микроциркуляции лежат в основе патогенеза сердечно-сосудистых заболеваний, для лечения которых давно и успешно применяется КВЧ-терапия. Ряд исследователей [15, 16, 32] описывают положительное влияние КВЧ-терапии на микроциркуляцию, в частности, снижение «конъюнктивного индекса», уменьшение диаметра венул, ускорение кровотока [5]. По данным инфракрасной термографии, мм-терапия улучшает состояние микроциркуляции в тканях в патологическом очаге [4]. В процессе КВЧ-терапии наблюдалось увеличение кровотока в зоне поражения, начиная с первых минут сеанса лечения, которое сохранялось длительное время. В других экспериментальных и клинических исследованиях показано, что под влиянием ЭМИ КВЧ (спектральная плотность мощности устройства — 10^{-19} Вт/Гц; λ — 4,1 мм, плотность потока мощности — 10 мВт/см², экспозиция — 15 мин) происходит нормализация процессов микроциркуляции, выражающаяся в уменьшении периваскулярных нарушений и неравномерности диаметра венул и артериол, исчезновении отека, увеличении функционирующих капилляров [6, 37].

М. А. Ронкин с соавт. [32] выявили выраженный положительный вазотропный эффект КВЧ-терапии в экспериментальном исследовании и рекомендовали ее применение при заболеваниях, в патогенезе которых имеют место гемодинамические расстройства [26].

В. А. Люсовым с соавт. [25] было отмечено улучшение микроциркуляции в сердечной мышце у больных нестабильной стенокардией, получавших курс КВЧ-терапии (λ — 7,1 мм). Методом бульбарной биомикроскопии глаза у больных ишемической болезнью сердца, острым инфарктом миокарда было выявлено, что на фоне мм-терапии наблюдалось

значительное снижение общего конъюнктивного индекса, индекса сосудистых и внутрисосудистых изменений, увеличение калибра артериол, числа функционирующих петель лимба, на фоне чего происходило уменьшение извитости и неравномерности сосудов различного калибра и, как следствие, значительное улучшение тканевой перфузии [27, 33]. У больных гипертонической болезнью оценка состояния мозгового кровотока на фоне мм-терапии методом динамической сцинтиграфии выявила улучшение кровотока в бассейнах пораженных артерий, перераспределение объема крови в сторону наиболее ишемизированных участков [11, 27].

В другом исследовании у больных гипертонической болезнью при лечении нарушений центральной и периферической гемодинамики ЭМИ КВЧ (λ — 5,6 мм, 7,1 мм, плотность потока мощности — 10 мВт/см²) способствовало снижению периферического сопротивления [13].

Методом реографии исследовали микроциркуляцию у больных некоторыми нейрососудистыми расстройствами — ангиовегетодистонией, гипертонией, синдромом Рейно, получавших курс мм-терапии. Авторами [14] было отмечено, что КВЧ-терапия оказывала нормализующее воздействие на нарушенную микроциркуляцию независимо от конкретной патологии. В частности, зарегистрировано увеличение числа функционирующих капилляров и увеличение наполнения их кровью.

Интересны результаты о влиянии КВЧ-терапии (λ — 4,9 мм, плотность потока мощности — 5 мВт/см², постоянный режим) на тканевую гемодинамику, выявленные в репрезентативной точке поджелудочной железы у больных с острым панкреатитом методом ЛДФ. Поскольку анатомическое расположение поджелудочной железы исключает прямое неинвазивное исследование микроциркуляции крови, авторами был разработан и запатентован метод оценки процессов микроциркуляции во время течения острого панкреатита методом ЛДФ в биологически активных точках, являющихся «глашатаями» состояния меридиана поджелудочной железы. Было показано, что включение мм-терапии в лечение больных привело к раннему восстановлению системной микроциркуляции и ее реституции к моменту клинического выздоровления, что выразилось в исчезновении компенсаторных механизмов гемомикроциркуляции на системном уровне и снижении степени микроциркуляторной недостаточности до первой степени в сигнальной точке поджелудочной железы [8].

Одним из наиболее методологически эффективных является применение ЭМИ КВЧ на рефлексогенные зоны заинтересованных органов, точки акупунктуры, соответствующие им, или зоны проекции этих органов. КВЧ-пунктура улучшает микроциркуляцию в заинтересованном суставе, происходит выравнивание градиента глубинной интегральной температуры больной и здоровой конечностей, что подтверждается данными радиотермометрического исследования [17].

В наших предыдущих исследованиях, при одно-

кратном воздействии ЭМИ КВЧ (λ — 7,1 мм, плотность потока мощности — 0,1 мВт/см²) на рефлексогенные области, методом ЛДФ было показано, что КВЧ-излучение, в первую очередь, затрагивает миогенные и эндотелиальные регуляторные компоненты микроциркуляторного русла, способствуя увеличению функциональной активности микровазкулярного эндотелия и снижению миогенного тонуса [40].

Как правило, в проводимых исследованиях по изучению биологического действия ЭМИ КВЧ используется облучение целого организма или изолированных органов, тканей, клеток. Поэтому уникальные эксперименты проведены А. А. Яшиным и Т. И. Субботиной [37] по исследованию процесса прямого воздействия ЭМИ КВЧ (λ —4,1 мм, 10 мВт/см², экспозиция —15 мин) на открытый орган — печень. В опытной группе животных преобладали изменения в микроциркуляторном русле, выражающиеся в прогрессирующем усилении микроциркуляции с компенсированным оттоком крови.

Обращает на себя внимание тот факт, что ЭМИ КВЧ, так же как и некоторые ЭМИ других диапазонов, оказывает гомеостатическое действие на сосудистый тонус, в частности, понижает исходно повышенный сосудистый тонус, а также способствует облегчению затрудненного венозного оттока [21, 24]. Приведенные клинические и экспериментальные данные согласуются с нашими исследованиями, в которых также было показано, что курсовое воздействие низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ (λ — 7,1 мм, плотность потока мощности — 0,1 мВт/см²) способствует нормализации микрососудистого тонуса и улучшению венозного оттока [40].

Таким образом, модулирующий сосудодвигательный эффект КВЧ-воздействия выражен в большей степени, вероятно, при исходно измененном состоянии сосудистого тонуса [12].

Заключение

В настоящее время не вызывает сомнения тот факт, что ЭМИ различных диапазонов обладают выраженной биологической активностью, в том числе способствуют изменению процессов микроциркуляции. Однако сведения, касающиеся действия ЭМИ на процессы микроциркуляции крови, крайне противоречивы. Так, ряд работ свидетельствует о вазодилаторном эффекте влияния ЭМИ [72, 97, 100], другие сообщают о вазоконстрикторном действии [43, 52, 103], и, наконец, третьи вообще констатируют отсутствие каких-либо эффектов [65–67, 71, 92, 108].

Анализ литературных данных отечественных и зарубежных авторов позволяет утверждать, что невозпроизводимость результатов исследования может быть связана с рядом факторов.

Во-первых, известно, что величина биологического эффекта, или биотропность, связана с параметрами ЭМИ (частота, интенсивность, экспозиция, модуляция). Для решения вопроса о биологической значимости того или иного фактора важное значение имеют данные о минимальных значениях его

интенсивности, при которой фиксируется биологический ответ. Однако вопрос о пороговом характере ответной реакции микроциркуляторных процессов на ЭМИ остается открытым. Вместе с тем, как показали результаты проведенных исследований, зарегистрирована биологическая активность в отношении изменения показателей микроциркуляции ЭМИ различных диапазонов достаточно низкой интенсивности [26]. Эти данные соответствуют современным представлениям о биологической эффективности сверхмалых или микродоз [9]. Выяснено также, что биологический эффект далеко не всегда возрастает с увеличением интенсивности ЭМИ, более того, применение ЭМИ высоких интенсивностей чаще вызывает негативные реакции со стороны микрососудистого русла [52]. Обращает на себя внимание также тот факт, что биологический эффект переменного ЭМИ зависит от частоты: действие ЭМИ только определенных частот вызывает биологический эффект, а на разных частотах эффект может иметь различный знак, т. е. существуют «частотные окна», однако для каждой выделенной биоактивной частоты существует своя оптимальная интенсивность, при которой фиксируется максимальный биологический эффект [26]. Продолжительность воздействия также является важным фактором, определяющим величину и характер ответной реакции, развивающейся на действие ЭМИ.

Следовательно, полученные в ряде работ отрицательные эффекты действия ЭМИ на процессы микроциркуляции или вообще отсутствие статистически значимых результатов могут быть связаны со сложной зависимостью биоэффективности поля от его параметров.

Во-вторых, биологическая эффективность ЭМИ зависит от свойств биологического объекта. Многочисленные исследования свидетельствуют о том, что изменение микроциркуляторных процессов под влиянием ЭМИ существенно зависят от особенностей биологического объекта. В экспериментальных исследованиях воздействовали на различные биообъекты: ткани и органы человека и животных (кожа конечностей [67, 68], мышцы [73], хвостовые сосуды [109] и др.), целостный организм. При этом следует отметить, что в полной мере чувствительность к ЭМИ проявляется только на уровне организма и значительно снижается у изолированных органов и тканей [31].

Анализ литературных данных убедительно демонстрирует зависимость изменений показателей микроциркуляции крови под влиянием ЭМИ от исходного функционального состояния биологического объекта. Большинство исследований, посвященных действию ЭМИ на периферическое кровообращение, свидетельствуют о гомеостатическом эффекте этого фактора, т. е. эффективность действия ЭМИ зависит от исходного сосудистого тонуса, приводя к его снижению или повышению в случае исходно повышенного или сниженного соответственно. В связи с этим у некоторых исследователей [73] сформировалось представление об отсутствии действия ЭМИ, если исходный сосудистый тонус находится

ОБЗОРЫ

в норме. Доказательством этому служат исследования, в которых не было отмечено изменения перфузии у здоровых людей при действии ПМП [67].

Кроме того, в доступной литературе нам не встретились исследования, демонстрирующие зависимость изменений процессов микроциркуляции от индивидуальной чувствительности человека и животных к ЭМИ. Однако вопрос о неодинаковой чувствительности различных биообъектов к ЭМИ перешел из теоретической в чисто практическую плоскость в связи с описанием феномена гиперчувствительности к электрическим и магнитным полям [59].

Таким образом, вполне понятно, что невоспроизводимость результатов исследования во многом определяется неодинаковой чувствительностью к действию ЭМИ человека и животных с различными индивидуально-типологическими особенностями.

Указанные противоречия могут быть вызваны использованием различной измерительной аппаратуры, различных методов для оценки показателей микроциркуляции и, как следствие, разными исследуемыми параметрами капиллярного кровотока.

Невоспроизводимость результатов исследований может быть связана и с другими причинами. В реальных условиях редко наблюдается изолированное действие одного какого-либо фактора, как правило, имеет место комбинированное воздействие различных факторов, суммарный эффект воздействия которых может быть различным.

В большинстве приведенных исследований, в связи с методическими особенностями исследования параметров микрокровоотока на животных, использовались различные виды анестетиков, оказывающие влияние на микроциркуляторную систему [62]. Так, например, в экспериментах на животных часто использовались кетамин, пенобарбитал, уретан, пропофол, известные своим действием на сосудистую систему. Однако вопрос о воздействии ЭМИ на механизм действия анестетиков и, как следствие, суммарное действие на сосудистую систему остается открытым в настоящее время.

Следует указать еще одну возможную причину противоречивости результатов экспериментальных и клинических исследований: в большинстве исследований измерения показателей микроциркуляции проводят после воздействия ЭМИ, однако регистрация изменения изучаемых показателей во время действия ЭМИ позволит вскрыть механизмы биологического действия этого физического фактора.

Механизм действия ЭМИ различных диапазонов на процессы микроциркуляции до конца не изучены, однако появление новых публикаций по исследованию этого вопроса свидетельствует о большом интересе к данной проблеме. Исходя из собственных и литературных данных, механизм действия ЭМИ на систему микроциркуляции представляется следующим.

Механизмы биологического действия ЭМИ характеризуются местными/локальными, возникающими в области воздействия ЭМИ, и генерализованными (нейрогуморальными) путями развития

ответных реакций. В первую очередь, при действии ЭМИ проявляются локальные реакции, приводящие к перераспределению ионного баланса в области воздействия. Так, внешнее ЭМИ может воздействовать на биологическую систему на уровне трансдукции внутриклеточных сигналов, что напрямую связано с изменением кальцийрегулируемых процессов в клетке [2, 3, 10, 47, 75]. В настоящее время осцилляции ионов кальция рассматривают как одну из главных биологических мишеней действия разных типов ЭМИ [23]. Кроме того, некоторые ЭМИ способны изменять активность протеинкиназы С, с помощью которой опосредуются как миогенные, так и эндотелийзависимые реакции [22, 58, 98].

Другой предполагаемой мишенью действия ЭМИ в системе микроциркуляции крови рассматривают эндотелиальные клетки. Так, ряд экспериментальных данных свидетельствует как об увеличении скорости роста самих эндотелиальных клеток, так и о возрастании концентрации метаболитов эндотелия, в частности, оксида азота [57, 111]. В последнее время в литературе широко обсуждается вопрос о посреднической роли оксида азота и его метаболитов при действии ЭМИ [71, 78, 79, 72].

Генерализованные реакции на электромагнитные факторы зависят от их параметров и протекают по законам сенсорной физиологии: амплитуда афферентных ответов нелинейно зависит от интенсивности физического фактора, в частности, избирательность таких реакций обусловлена структурно-пространственными особенностями рецепторного аппарата. Так, ЭМИ, изменяя ионный баланс, оказывают модулирующее влияние на изменение потока импульсной активности восходящих структур [43] к высшим отделам головного мозга, изменяя функциональную активность желез внутренней секреции и выработки гормонов. В частности, было показано, что некоторые ЭМИ способствуют изменению концентрации альдостерона и ангиотензина [79]. Возникающие при этом реакции развиваются в течение длительного времени.

Таким образом, выраженность ответных реакций со стороны микроциркуляции и степень участия в них различных звеньев нейрогуморальной регуляции определяются количеством и природой поглощенной энергии. Причем вышеизложенная схема биологического ответа реализуется при действии как осцилляторного, так и теплового компонентов ЭМИ. При этом с увеличением интенсивности фактора происходит последовательное включение местных и генерализованных реакций. Вместе с тем каждый электромагнитный фактор способен оказывать специфическое, присущее ему действие.

Специфичность действия проявляется наиболее отчетливо при влиянии низкоинтенсивных факторов (плотность потока мощности менее 10 мВт/см^2), в частности, ЭМИ КВЧ-диапазона, энергии которых недостаточно для значительного нагрева тканей или изменения их функций [7]. Известно, что низкоинтенсивное ЭМИ КВЧ действует на кальцийзависимые системы внутриклеточной сигнализации, способно изменять концентрацию внутриклеточного

кальция или менять сродство белков к ионам кальция [2, 3, 10], обеспечивая осцилляторный компонент действия ЭМИ.

При низкой интенсивности нагрев облучаемых объектов в эксперименте не превышает 0,1°C, однако даже в случае таких низких интенсивностей излучения при неоднородной удельной поглощенной мощности и плоскости объекта могут возникать микронагревы отдельных участков облучаемого объекта [39], которые могут обуславливать местные реакции. Известно, что под влиянием ЭМИ КВЧ [30, 38] происходит дегрануляция тучных клеток с выделением биологически активных веществ, например, гистамина, серотонина, гепарина. Биологически активные вещества, выделяемые из тучных клеток, оказывают влияние на многочисленные нервные окончания, что может быть причиной формирования ответа всего организма на действие ЭМИ КВЧ [30, 36]. Кроме того, многие исследователи делают вывод о том, что интенсивности ЭМИ КВЧ, используемой в терапии, достаточны для активации рецепторов (термо-, механорецепторов) и других нервных окончаний, расположенных в коже

[1]. После первичной рецепции сигнал из периферических нервных окончаний поступает в ЦНС, что может быть причиной рефлекторного изменения тонуса кровеносных сосудов.

Результаты настоящего литературного обзора свидетельствуют об эффективном использовании ЭМИ КВЧ для лечения заболеваний, в патогенезе которых отмечаются выраженные нарушения процессов микроциркуляции крови, однако они носят в основном описательный характер, в то время как экспериментальный материал практически отсутствует. В связи с этим невозможно установить механизмы действия низкоинтенсивного мм-излучения на процессы микрогемодинамики. Поэтому необходимы дополнительные исследования влияния ЭМИ КВЧ как на процессы микроциркуляции, так и на механизмы управления микрокровоотоком, так как это предполагает большие перспективы для понимания механизмов биологического действия этого физического фактора, с одной стороны, а с другой, более эффективного использования мм-терапии как с лечебной целью, так и для профилактики микроциркуляторных нарушений.

Литература

1. Алексеев, С. И. Электрофизиологическое исследование влияния миллиметровых волн на нервные клетки / С. И. Алексеев, М. С. Зискин, Н. В. Кочеткова // Миллиметровые волны в биол. и мед. — 1997. — № 9–10. — С. 34–38.
2. Аловская, А. А. Биологический эффект ЭМИ КВЧ определяется функциональным статусом клеток / А. А. Аловская [и др.] // Вестник новых мед. технологий. — 1998. — Т. 5. — № 2. — С. 11–14.
3. Аловская, А. А. Резонансное ингибирование активности перитонеальных нейтрофилов мыши при действии низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ в ближней и дальней зонах антенны / А. А. Аловская [и др.] // Вестник новых мед. технологий. — 1997. — Т. 4. — № 3. — С. 38–45.
4. Аппаратурное обеспечение современных технологий квантовой медицины / под ред. С. П. Ситько, Ю. А. Скрипник, А. Ф. Яненко. — Киев : ФАДА ЛТД, 1999. — 199 с.
5. Бабов, К. Д. Влияние ЭМИ частотой 59–68 ГГц на больных инфарктом миокарда в подострой стадии / К. Д. Бабов, С. А. Новиков // Вопросы курортол., физиотер. и леч. физкульт. — 1993. — № 6. — С. 10.
6. Бессонов, А. Е. Способ миллиметрово-волновой терапии / А. Е. Бессонов, М. В. Балакирев // Вестник новых медицинских технологий. — 1998. — Т. 5. — № 2. — С. 105–108.
7. Боголюбов, В. М. Общая физиотерапия / В. М. Боголюбов, Г. Н. Пономаренко. — М. ; СПб. : Правда, 1996. — 480 с.
8. Букатко, В. Н. Лазерная доплеровская флоуметрия в изучении эффектов миллиметровой волновой терапии / В. Н. Букатко, С. А. Данилова // Миллиметровые волны в биол. и мед. — 2004. — № 4 (36). — С. 28–39.
9. Бурлакова, Е. Б. Особенности действия сверхмалых доз биологически активных веществ и физических факторов низкой интенсивности / Е. Б. Бурлакова // Рос. хим. журн. — 1999. — Т. XLIII. — № 5. — С. 3–11.
10. Гапеев, А. Б. Действие непрерывного и модулированного ЭМИ КВЧ на клетки животных : обзор. Ч. I : Особенности и основные гипотезы о механизмах биологического действия ЭМИ КВЧ / А. Б. Гапеев, Н. К. Чемерис // Вестник новых мед. технологий. — 1999. — Т. 6. — № 1. — С. 15–22.
11. Гапонюк, П. Я. Сравнительное изучение клиниче-

ОБЗОРЫ

ской эффективности электромагнитных волн миллиметрового диапазона при облучении различных рефлекторных зон у больных с гастродуоденальными язвами / П. Я. Гапонюк [и др.] // Миллиметровые волны в медицине : сб. ст. Т. 1 / под ред. Н. Д. Девяткова, О. В. Бецкого. — М., 1991. — С. 32–36.

12. Голант, М. Б. КВЧ-радио-физические подходы к проблеме ускорения лечения локальных нарушений в организме, ослабленном возрастными или иными изменениями / М. Б. Голант, Л. Е. Гедымин, Л. Н. Новикова // Материалы 10-го рос. симп. с международ. участием «Миллиметровые волны в биологии и медицине». — М., 1995. — С. 91–94.

13. Головачева, Т. В. Электромагнитное излучение миллиметрового диапазона как метод патогенетической терапии заболеваний сердечно-сосудистой системы / Т. В. Головачева [и др.] // Миллиметровые волны в биол. и мед. — 2000. — № 1 (17). — С. 18–25.

14. Детлавс, И. Коррекция нейрососудистых расстройств электромагнитным полем ММ-диапазона / И. Детлавс, Ю. Лавенделс, М. Мурниеце // 11-й Рос. симп. с международ. участием «Миллиметровые волны в квантовой медицине». — М. : ИРЭ РАН, 1997. — С. 78–79.

15. Дзюблик, А. Я. Актуальные вопросы немедикаментозного лечения заболеваний органов дыхательной, сердечно-сосудистой и нервной систем / А. Я. Дзюблик [и др.] ; под ред. С. С. Солдатченко. — Ялта, 1996. — С. 30–31.

16. Жуков, Б. Н. Положительное влияние миллиметрового излучения низкой интенсивности на микроциркуляцию у мышей с аллоксановым сахарным диабетом / Б. Н. Жуков, Н. А. Лысов // Всерос. конгр. «Миллиметровые волны в биологии и медицине» : Материалы. — М., 1997. — С. 120–121.

17. Капустина, Н. Б. Использование глубинной интегральной радиотермометрии для оценки изменения микроциркуляции при КВЧ-терапии у больных с деформирующим артрозом тазобедренного сустава и болезнью Переса / Н. Б. Капустина [и др.] // Вестник Нижегород. гос. ун-та им. Н. И. Лобачевского. — 2001. — № 2 (4). — С. 46–52.

18. Клиническая физиотерапия / под ред. В. В. Оржешковского, Н. Г. Гусева. — Киев, 1984 — С. 79–86.

19. Королев, Ю. Н. Роль локализации воздействия дециметровыми волнами на течение процессов регенерации / Ю. Н. Королев, Юк. Королев, П. 3. Загорская // Вопросы курортол. — 1985. — № 2. — С. 37–42.

20. Кудряшов, Ю. Б. Биофизические основы действия микроволн / Ю. Б. Кудряшов, Э. Ш. Исмаилов, С. Зубкова. — М. : МГУ, 1980. — 160 с.

21. Куницына, Л. А. Сравнительная характеристика клинко-физиологического действия электромагнитного излучения миллиметрового и нанометрового диапазона при гипертонической болезни / Л. А. Куницына, С. В. Безрученко, Н. Н. Богданова // Вопросы курортол., физиотер. и леч. физкульт. — 1998. — Т. 5. — С. 5–7.

22. Леднев, В. В. Биоэффекты слабых комбинированных постоянных и переменных магнитных полей / В. В. Леднев // Биофизика. — 1996. — Т. 41. — № 1. — С. 224–231.

23. Лиманский, Ю. П. Постоянные магнитные поля и их применение в медицине // Ю. П. Лиманский, С. А. Гуляр. — Киев : Ин-т физиол. им. А. Н. Богомольца Украины, 2006. — 320 с.

24. Локишина, О. Д. Состояние гемодинамики и изменения сократительной функции миокарда у больных стенокардией в процессе лечения КВЧ / О. Д. Локишина, Т. Б. Реброва // Миллиметровые волны в медицине и биологии : сборник. — М., 1989. — С. 41–42.

25. Люсов, В. А. Некоторые механизмы влияния миллиметрового излучения на патогенез нестабильной стенокардии / В. А. Люсов [и др.] // Сб. докл. 10-й рос. симп. с международ. участием «Миллиметровые волны в биологии и медицине». — М., 1995. — С. 26–27.

26. Миллиметровые волны и живые системы / под ред. О. В. Бецкого, В. В. Кислова, Н. Н. Лебедевой. — М. : САЙНС-ПРЕСС, 2004. — 107 с.

27. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / под ред. Н. Д. Девяткова, М. Б. Голанта, О. В. Бецкого. — М. : Радио и связь, 1991. — 168 с.

28. Мкртчян, Р. И. Санаторно-курортное лечение в медицинской и трудовой реабилитации больных с различными формами ишемической болезни сердца / Р. И. Мкртчян // Физические методы восстановительного лечения больных ишемической болезнью сердца в курортных и во внекурортных условиях. — М., 1980. — С. 23–25.

29. Мухарлямов, Н. М. Ранние стадии недостаточности кровообращения и механизмы ее компенсации / Н. М. Мухарлямов, В. Ю. Мареев. — М. : Медицина, 1978. — 248 с.

30. Попов, В. И. Дегрануляция тучных клеток кожи под действием низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты / В. И. Попов, В. В. Рогачевский, А. Б. Гапеев // Биофизика. — 2001. — Т. 46. — Вып. 6. — С. 1096–1102.

31. Пресман, А. С. Электромагнитные поля и живая природа. — М. : Наука, 1968. — 288 с.

32. Ронкин, М. А. Реография в клинической практике / М. А. Ронкин. — М. : МБН, 1997. — 403 с.

33. Смирнова, М. Ю. Состояние микроциркуляторного русла у больных инфарктом миокарда на фоне мм-терапии ЭМИ ММД / М. Ю. Смирнова, Н. Л. Волов, А. Ю. Лебедева // 13-й рос. симп. с международ. участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии». — М., 2003. — С. 72.

34. Соколов, Б. А. Сравнительная оценка влияния электромагнитного поля крайне высокой частоты на церебральную гемодинамику у больных гипертонической болезнью при воздействии на различные рефлексогенные зоны / Б. А. Соколов, С. В. Безрученко, Л. А. Куницына // Вопросы курортол., физиотер. и леч. физкульт. — 1998. — Т. 1. — С. 16–18.

35. Сорокина, Е. И. Применение физических факторов в отдаленном послеоперационном периоде после хирургического лечения ишемической болезни сердца / Е. И. Сорокина, М. П. Отто // Вопросы курортологии. — 1985. — № 9 (3). — С. 8–12.

36. Струсов, В. В. Хирургические аспекты применения КВЧ-терапии / В. В. Струсов, Д. В. Уткин, В. А. Дремучев // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1995. — № 6. — С. 48–49.

37. Субботина, Т. И. Экспериментально-теоретическое исследование КВЧ-облучения открытой печени прооперированных крыс и поиск новых возможностей высокочастотной терапии / Т. И. Субботина, А. А. Яшин // Вестник новых мед. технологий. — 1998. — Т. 5. — № 1. — С. 122–126.

38. Хижняк, Е. П. О роли пространственного распределения поглощения ЭМИ в формировании биоэффектов при КВЧ-облучении / Е. П. Хижняк, О. В. Бецкий, В. Н. Воронков // Сб. докл. Междунар. симп. «Миллиметровые волны нетепловой интенсивности в медицине». Т. 3. — М. : ИРЭ АН СССР, 1991. — С. 630–635.

39. Хургин, Ю. И. Первичная рецепция миллиметровых волн / Ю. И. Хургин // Сб. докл. Междунар. симп. «Миллиметровые волны нетепловой интенсивности

в медицине». Т. 3. — М. : ИПЭ АН СССР, 1991. — С. 560–565.

40. Чуюн, Е.Н. Динамика процессов микроциркуляции под влиянием ЭМИ КВЧ / Е. Н. Чуюн, Н. С. Трибрат, М. Ю. Раваева // Сб. докл. V Междунар. конгр. «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине. — СПб., 2009. — С. 31.

41. Adair, E. R. Microwaves modify thermoregulatory behaviour in squirrel monkey / E. R. Adair, B. W. Adams // *Bioelectromagnetic*. — 1980. — № 1. — P. 1–20.

42. Aubineau, P. Head exposure to 900 MHz microwaves induces plasma protein extravasation in the rat brain and dura mater at non-thermal SAR levels. In *Monografie Workshops : Influences of RF- and electromagnetic field interaction* / P. Aubineau, F. Tore // *Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik*. — 2005. — P. 82–83.

43. Braune, S. Resting blood pressure increase during exposure to a radio-frequency electromagnetic field / S. Braune [et al] // *Lancet*. — 1998. — № 351 (9119). — P. 1857–1858.

44. Franke, H. Effects of universal mobile telecommunications system (UMTS) electromagnetic fields on the blood-brain barrier in vitro / H. Franke [et al] // *Rad. Res*. — 2005. — № 164. — P. 258–269.

45. Gmitrov, J. Effect of 0,25 T static magnetic field on microcirculation in rabbits / J. Gmitrov, C. Ohkubo, H. Okano // *Bioelectromagnetics*. — 2002. — № 23. — P. 224–249.

46. Gmitrov, J. Geomagnetic disturbance worsen microcirculation impairing arterial baroreflex vascular regulatory mechanism / J. Gmitrov // *Electromagn. Biol. Med*. — 2005. — № 24. — P. 31–37.

47. Gmitrov, J. Static magnetic field and verapamil effect on baroreflex stimulus-induced microcirculatory responses / J. Gmitrov // *Electromagn. Biol. Med*. — 2004. — № 23. — P. 141–155.

48. Haarala, C. Effects of a 902 MHz mobile phone on cerebral blood flow in humans : A PET study / C. Haarala [et al] // *Neuroreport*. — 2003. — № 14. — P. 2019–2023.

49. Hinman, M. R. Comparative effect of positive and negative static magnetic fields on heart rate and blood pressure in healthy adults / M. R. Hinman // *Clin. Rehabilitation*. — 2002. — № 16. — P. 669–674.

50. Huber, R. Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG / R. Huber [et al] // *J. Sleep Res*. — 2002. — № 11. — P. 289–295.

51. Ichioka, S. Biological effects of static magnetic fields on the microcirculatory blood flow in vivo : a preliminary report / S. Ichioka [et al] // *Med. Biol. Eng. Comput*. — 1998. — № 36 (1). — P. 91–95.

52. Ichioka, S. High-intensity static magnetic fields modulate skin microcirculation and temperature in vivo / S. Ichioka [et al] // *Bioelectromagnetics*. — 2000. — № 21. — P. 183–188.

53. Ichioka, S. Skin temperature changes induced by strong static magnetic field exposure / S. Ichioka [et al] // *Bioelectromagnetics*. — 2003. — № 24. — P. 380–386.

54. Jauchem, JR. Exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields and radiofrequency radiation : cardiovascular effects in humans / JR. Jauchem // *Int. Arch. Occup. Environ. Health*. — 1997. — № 70 (1). — P. 9–21.

55. Jia, F. Role of blood flow on RF exposure induced skin temperature elevations in rabbit ears / F. Jia [et al] // *Bioelectromagnetics*. — 2006. — № 26. — P. 163–172.

56. Kangarlu, A. Cognitive, cardiac, and physiological safety studies in ultra high field magnetic resonance imaging / A. Kangarlu [et al] // *Magnetic Resonance Imaging*. — 1999. — № 17. — P. 1407–1416.

57. Kavaliers, M. Evidence for the involvement of nitric oxide and nitric oxide synthase in the modulation of opioid-induced antinociception and the inhibitory effects of exposure to 60-Hz magnetic fields in the land snail // M. Kavaliers [et al] // *Brain Res*. — 1998. — № 809. — P. 50–57.

58. Kizub, I. Proteine kinase C modulates miofilaments Ca²⁺-sensitivity in vascular smooth : possible role in vasospasm development / I. Kizub, A. Pavlova, A. Soloviov // *J. Muscle Rec. and Cell Motil*. — 2005. — Vol.26. — № 1. — P. 70.

59. Knave, B. Hypersensitivity to electricity — a workplace phenomenon related to low frequency electric and magnetic fields / B. Knave, U. Bergqvist, R. Wibon // *Worldwide Achievement in Public and Occupational Health Protection Association*. — 1992. — P. 1121–1124.

60. Kuipers, N. T. Influence of static magnetic fields on pain perception and sympathetic nerve activity in humans / N. T. Kuipers, C. L. Sauder, C. A. Ray // *Jour. of Applied Physiology*. — 2006. — № 102. — P. 1410–1415.

61. Kuribayashi, M. Lack of effects of 1439 MHz electromagnetic near field exposure on the bloodbrain barrier in immature and young rats / M. Kuribayashi, J. Wang, O. Fujiwara [et al] // *Bioelectromagnetics*. — 2005. — № 26. — P. 578–588.

62. Longnecker, D. Microcirculatory actions of general anaesthetics / D. Longnecker, P. Harris // *Fed. Proc*. — 1980. — № 39. — P. 1580–1583.

63. Martel, G. F. Comparison of static and placebo magnets on resting forearm blood flow in young, healthy men / G. F. Martel, S. C. Andrews, C. G. Roseboom // *Journ. of Orthop. and Sports Physical Therapy*. — 2002. — № 32. — P. 518–524.

64. Masuda, H. Acute effects of local exposure to radio-frequency electromagnetic fields on the cerebral microcirculation in rats / H. Masuda [et al] // *The 23rd Annual Meeting of Bioelectromagnetic Society Abstract Book*. — 2001. — P. 139–140.

65. Masuda, H. Chronic effects of local exposure to radiofrequency electromagnetic fields on the cerebral microcirculation in rats / H. Masuda [et al]. — *Asia-Pacific Radio Science Conference Digest*, 2001. — 410 p.

66. Masuda, H. Effects of acute exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain / H. Masuda [et al] // *In Vivo*. — 2007. — Vol. 21. — № 4. — P. 555–562.

67. Mayrovitz, H. No effect of 85 mT permanent magnets on laser-Doppler measured blood flow response to inspiratory gasps / H. Mayrovitz, E. Groseclose, D. King // *Bioelectromagnetics*. — 2005. — № 26. — P. 331–335.

68. Mayrovitz, H. Effects of permanent magnet on resting skin blood perfusion unhealthy persons assessed by laser Doppler flowmetry and imaging / H. Mayrovitz, E. Groseclose, M. Markov, A. Pilla // *Bioelectromagnetics*. — 2001. — № 22. — P. 494–502.

69. Mayrovitz, HN. A preliminary study to evaluate the effect of pulsed radio frequency field treatment on lower extremity peri-ulcer skin microcirculation of diabetic patients / HN. Mayrovitz, PB. Larsen // *Wounds*. — 1995. — № 7. — P. 90–93.

70. Mayrovitz, HN. Effects of pulsed electromagnetic fields on skin microvascular blood perfusion / HN. Mayrovitz, PB. Larsen // *Wounds*. — 1992. — № 4. — P. 197–202.

71. McKay, J.C. Extremely low frequency pulsed electromagnetic field designed for antinociception does not affect microvascular responsiveness to the vasodilator acetylcholine / C. J. McKay [et al] // *Bioelectromagnetics*. — 2009. — P. 321–335.

72. Miura, M. Non-thermal vasodilatation by radio

ОБЗОРЫ

- frequency burst-type electromagnetic field radiation in the frog / M. Miura, J. Okada // *J. Physiol.* — 1991. — № 435. — P. 257–273.
73. Morris, C. Static magnetic fields alter arteriolar tone in vivo / C. Morris, T. Skalak // *Bioelectromagnetics.* — 2005. — № 26. — P. 1–9.
74. Neeman, M. Structural, functional, and molecular MR imaging of the microvasculature / M. Neeman, H. Dafni // *Ann. Rev. Biomed. Eng.* — 2003. — № 5. — P. 29–56.
75. Obo, M. Effect of magnetic field exposure on calcium channel current using patch clamp technique / M. Obo [et al] // *Bioelectromagnetics.* — 2002. — № 4. — P. 306–314.
76. Ohkubo, C. Acute effects of static magnetic fields on cutaneous microcirculation in rabbits / C. Ohkubo, S. Xu // *In Vivo.* — 1997. — № 11. — P. 221–225.
77. Ohmoto, Y. Sequential changes in cerebral blood flow, early neuropathological consequences and BBB disruption, following RF-induced localized hyperthermia in the rat / Y. Ohmoto [et al] // *Int. J. Hyperthermia.* — 1996. — № 12(3). — P. 321–334.
78. Okano, H. Anti-pressor effects of whole-body exposure to static magnetic field on pharmacologically induced hypertension in conscious rabbits / H. Okano, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2003. — № 24. — P. 139–147.
79. Okano, H. Decreased plasma levels of nitric oxide metabolites, angiotensin II and aldosterone in spontaneously hypertensive rats exposed to 5 mT static magnetic field / H. Okano, H. Masuda, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2005. — № 26. — P. 161–172.
80. Okano, H. Effects of 12 mT static magnetic field on sympathetic agonist-induced hypertension and hemodynamic changes in wistar rats / H. Okano, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2007. — № 28. — P. 369–378.
81. Okano, H. Effects of 25 mT static magnetic field on blood pressure in reserpine-induced hypotensive wistar-kyoto rats / H. Okano, H. Masuda, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2005. — № 26. — P. 36–48.
82. Okano, H. Effects of static magnetic fields on plasma levels of angiotensin II and aldosterone associated with arterial blood pressure in genetically hypertensive rats / H. Okano, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2003. — № 24. — P. 403–412.
83. Okano, H. Elevated plasma nitric oxide metabolites in hypertension: Synergistic vasodepressor effects of a static magnetic field and nicardipine in spontaneously hypertensive rats / H. Okano, C. Ohkubo // *Clinic. Hemorheol. and Microcirc.* — 2006. — № 34. — P. 303–308.
84. Okano, H. Exposure to a moderate-intensity static magnetic field enhances the hypotensive effect of a calcium channel blocker in spontaneously hypertensive rats / H. Okano, C. Ohkubo // *Bioelectromagnetics.* — 2005. — № 26. — P. 611–623.
85. Pittman, R. Oxygen transport and exchange in the microcirculation / R. Pittman // *Microcirculation.* — 2005. — № 2. — P. 59–70.
86. Popel, A. Microcirculation and hemorheology / A. Popel, P. Johnson // *Ann. Rev. Fluid Mech.* — 2005. — № 37. — P. 43–69.
87. Prato, F. Blood-brain barrier permeability in rats is altered by exposure to magnetic fields associated with magnetic resonance imaging at 1.5 T / F. Prato [et al] // *Microsc. Res. Tech.* — 1994. — № 27. — P. 528–534.
88. Prato, F. Magnetic resonance imaging increases the blood-brain barrier permeability to 153-gadolinium 0diethylenetriamine-pentaacetic acid in rats / F. Prato [et al] // *Brain Res.* — 1990. — № 523. — P. 301–304.
89. Salford, L. G. Nerve cell damage in mammalian brain after exposure to microwaves from GSM mobile phones / L. G. Salford [et al] // *Nviron. Health Perspect.* — 2003. — Vol. 408. — № 111. — P. 881–883.
90. Salford, L. G. Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz / L. G. Salford [et al] // *Microsc. Res. and Techn.* — 1994. — № 27. — P. 535–542.
91. Schirmacher, A. Electromagnetic fields (1.8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro / A. Schirmacher [et al] // *Bioelectromagnetics.* — 2000. — № 21. — P. 338–345.
92. Schuhfried, O. The effects of low-dosed and high-dosed low-frequency electromagnetic fields on microcirculation and skin temperature in healthy subjects / O. Schuhfried [et al] // *Int. J. Sports Med.* — 2005. — № 26. — P. 886–890.
93. Segal, S. Regulation of blood flow in the microcirculation / S. Segal // *Microcirculation.* — 2005. — № 12. — P. 33–45.
94. Sharma, H. S. Hyperthermia induced pathophysiology of the central nervous system / H. S. Sharma, P. J. Hoopes // *Int. Journ. of Hypertherm.* — 2003. — № 19. — P. 325–354.
95. Shivers, R. R. Magnetic resonance imaging temporarily alters blood-brain barrier permeability in the rat / R. R. Shivers [et al] // *Neurosci Lett.* — 1987. — № 76 (1). — P. 25–31.
96. Shrivastav, S. Microwave hyperthermia and its effect on tumor blood flow in rats / S. Shrivastav, W. Kaelin, G. Jr. Joines // *Cancer Research.* — 1983. — № 43. — P. 4665–4669.
97. Smith, T. Microcirculatory effects of pulsed electromagnetic fields / T. Smith, D. Wong-Gibbons, J. Maulsby // *Orthop. Res.* — 2004. — № 22. — P. 80–84.
98. Soloviov, A. Ionizing radiation alters myofilament calcium sensitivity in vascular smooth muscle: Potential role of protein kinase C / A. Soloviov [et al] // *Am. J. Physiol. Regulat. Integrat. Compar. Physiol.* — 2005. — № 289. — P. R755–R762.
99. Steyn, P. F. Effect of a static magnetic field on blood flow to the metacarpus in horses / P. F. Steyn, D. W. Ramey, J. Kirschvink // *Journ. of the Am. Veterinary Medical Association.* — 2000. — № 217. — P. 874–877.
100. Szmigielski, S. Alteration of diurnal rhythms of blood pressure and heart rate to workers exposed to radiofrequency electromagnetic fields / S. Szmigielski [et al] // *Blood Press. Monit.* — 1998. — № 3 (6). — P. 323–330.
101. Tenforde, T. S. Magnetically induced electric fields and currents in the circulatory system / T. S. Tenforde // *Progress in Biophysics and Molec. Biology.* — 2005. — № 87. — P. 279–288.
102. Tsurita, G. Biological and morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field / G. Tsurita [et al] // *Bioelectromagnetics.* — 2000. — № 21. — P. 364–371.
103. Ueno, S. Effects of alternating magnetic fields and low-frequency electric currents on human skin blood flow / S. Ueno, P. Lövsund, P. Oberg // *Med. Biol. Eng. Comput.* — 1986. — № 24. — P. 57–61.
104. Ushiyama, A. Acute effects of low-frequency electromagnetic fields on leukocyte-endothelial interactions in vivo / A. Ushiyama, C. Ohkubo // *In Vivo.* — 2004. — № 18. — P. 125–132.
105. Ushiyama, A. Effects of subchronic exposure to extremely low frequency electromagnetic fields on tumor growth and angiogenesis in the mouse cranial window / A. Ushiyama, H. Masuda, C. Ohkubo // *Microcirculation annual.* — 2003. — P. 101–102.
106. Ushiyama, A. Subchronic effects on leukocyte-endothelial interactions in mice by whole body exposure to

extremely low frequency electromagnetic fields / A. Ushiyama, H. Masuda, S. Hirota // In Vivo. — 2004. — № 18. — P. 425–432.

107. Verdant, C. How monitoring of the microcirculation may help us at the bedside / C. Verdant, D. De Backer // *Curr. Opin. Crit. Care.* — 2005. — № 11. — P. 240–244.

108. Wenzel, F. Cutaneous Microcirculation is not altered by a Weak 50 Hz Magnetic Field / F. Wenzel, J. Reißweber, E. David // *Biomedical Engineering.* — 2006. — № 50 (1–2). — P. 14–18.

109. Xu, S. Acute effects of whole-body exposure to static magnetic fields and 50-Hz electromagnetic fields on muscle microcirculation in anesthetized mice / S. Xu, H. Okano, C. Ohkubo // *Bioelectrochemistry.* — 2001. — № 53. — P. 127–135.

110. Xu, S. Subchronic effects of static magnetic fields on cutaneous microcirculation in rabbits / S. Xu, H. Okano, C. Ohkubo // *In Vivo.* — 1998. — № 12. — P. 383–389.

111. Yoshikawa, T. Enhancement of nitric oxide generation by low frequency electromagnetic field // M. Tanigawa [et al] // *Pathophysiology.* — 2000. — № 7. — P. 131–135.