

Биофизика электромагнитных волн на радиофизическом факультете

(Б. Г. Емец)

1. Возникновение научной тематики биофизики электромагнитных волн

Благодаря созданию А. Вольтой химического источника постоянного электрического тока (1800 г.), возникла и начала развиваться электротехника. В 1831 году М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции. В 1865 г. Дж. Максвелл описал это явление строгими математическими уравнениями; в научный обиход вошли понятия «электромагнетизм», «переменное электромагнитное поле», «электромагнитные волны». Благодаря работам Г. Герца и А. С. Попова, появилась радиосвязь. С каждым годом лавинообразно увеличивалось число людей на нашей планете, оказавшихся вблизи электрических проводов или в зоне действия радиостанций. Обнаружилось, что живые организмы чрезвычайно чувствительны к электромагнитным (ЭМ) полям (ЭМП). Возникла научная проблематика, включающая как вопросы использования ЭМП в лечебных целях, так и рассмотрение задач защиты живых организмов от вредного влияния ЭМ полей. Первая в мире монография, посвященная влиянию ЭМП на биологические объекты, вышла в Харькове в 1900 году. Ее написал профессор Императорского Харьковского университета В. Я. Данилевский [1]. (Сегодня имя В. Я. Данилевского носит улица, расположенная вблизи университетских корпусов.)

В 1911 г. в Харьковский университет на преподавательскую работу прибыл ученик А. С. Попова — Д. А. Рожанский, который привлек университетскую молодежь к научным исследованиям в области радиофизики. Его ученики — А. А. Слуцкий и Д. С. Штейнберг создали в 1924 г. первый в мире магнетрон, генерирующий волны в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) — микроволны. (На Западе к этому времени существовали магнетроны лишь длинноволнового диапазона (А. Хелл, Е. Хабанн).) Через несколько лет А. А. Слуцкий получил рекордно мощные СВЧ колебания, что позволило ему создать радиолокатор дальнего действия [2—5]. Коллектив А. А. Слуцкого стал применять СВЧ-колебания как в технологических процессах в промышленности (нагревание материалов в микроволновом поле), так и в медицинских целях. В

1926 г. в Харьковском институте народного образования (так в те годы назывался Харьковский университет) А. А. Слуцкий создал сектор «Электромагнитные колебания», впоследствии преобразованный в кафедре с таким же наименованием. В 1933 г. (по совету В. Я. Данилевского) А. А. Слуцкий основал отдел биофизики в Украинском институте экспериментальной медицины (г. Харьков), где были выполнены первые в мире исследования по использованию СВЧ колебаний для лечения онкологических больных [6]. В 1935 году под председательством А. А. Слуцкого в Харькове состоялась «Конференция по применению ультракоротких радиоволн в медицине и в биологии» с участием специалистов из Москвы, Ленинграда и других городов СССР.

Правопреемницей кафедры электромагнитных колебаний в университете ныне является кафедра молекулярной и медицинской биофизики на радиофизическом факультете. Здесь продолжают работы по биофизике микроволн.

Эффективность физиотерапевтических процедур с применением СВЧ объясняется тем, что микроволны легко можно локализовать на небольших по поверхности и глубине участках тела пациента. В биосредах (как и в других объектах) энергия электромагнитных волн преобразуется в тепловую энергию. Теплопродукция единицы облучаемого объема диэлектрика равна [7]:

$$Q = \omega \varepsilon'' (c \cdot n)^{-1} I.$$

Здесь ω — частота облучающей электромагнитной (ЭМ) волны (в СВЧ диапазоне — десятки гигагерц); ε'' — мнимая часть диэлектрической проницаемости объекта; c — скорость света в вакууме; n — показатель преломления; I — интенсивность ЭМ волны в среде. Наличие теплопродукции приводит к повышению температуры облучаемого биообъекта, что и обеспечивает изменение его свойств. При этом реализуются как негативные эффекты (тепловое разрушение биоткани в случае использования больших интенсивностей облучающего ЭМ поля), так и лечебные результаты (в случае применения специально подобранной невысокой, т. н. «терапевтической» интенсивности облучающего поля). С другой стороны, соображения безопасности персонала, постоянно работающего с СВЧ (радиоинженеров и медработников), требовали проводить исследования профессиональной вредности микроволн (гигиенические аспекты). Отмеченные обстоятельства объясняют тот факт, что за период с 1930 г. по 1960 г. в отечественной и зарубежной литературе было опубликовано около 500 работ по вопросам биологического действия СВЧ колебаний (см., например, обзоры [8–12]). Известно, что механизм терморегуляции у человека способен предупреждать перегревание

тела, поддерживая его температуру в пределах нормы ($36,6^{\circ}\text{C}$). Факт перегревания негативно отражается на организме человека, а повышение его температуры на 1°C и выше является недопустимым. Эти гигиенические требования позволили определить минимальные интенсивности (пороговые значения) ЭМ излучений, вызывающие тепловой эффект (дециметровые волны — 40 мВт/см^2 ; сантиметровые и миллиметровые волны — 10 мВт/см^2). На этой основе были установлены соответствующие гигиенические стандарты (ГОСТы).

Для персонала, обслуживающего радиотехнические станции (включая радиолокационное оборудование) и разнообразные источники ЭМ полей, применяемые в промышленности для обеспечения технологических процессов, используются эффективные средства коллективной и индивидуальной защиты от негативного влияния радиоволн [13, 14]. Казалось бы, другие биологические организмы, не находящиеся в зоне излучения, где интенсивность превышает пороговое значение 10 мВт/см^2 , не испытывают никакого дискомфорта в связи с воздействием ЭМ волн. Однако уже в 1960-х годах были обнаружены существенные биологические «ответы» на факт облучения волнами с интенсивностями, меньшими 10 мВт/см^2 [15]. Специалисты всерьез стали говорить об экологически опасном «электромагнитном загрязнении» окружающей среды.

2. Биологические эффекты низкоинтенсивных микроволн

Влияние на нервную систему. В электроэнцефалограмме профессиональных регулировщиков радиоаппаратуры, работавших с микроволнами низкой интенсивности (НИ), регистрируются различные формы судорожной активности, часто возникающие при сенсорных провокациях [16]. Наблюдены изменения биоэлектрической активности отдельных структур мозга под влиянием модулированного микроволнового излучения малой мощности [17]. Облучение НИ микроволнами способствует увеличению проницаемости гематоэнцефалического барьера, а значит, повышает вероятность проникновения в ликвор ряда биологически активных веществ, нежелательных для нормальной деятельности мозга [18, 19]. Влияние низкоинтенсивных микроволн на мозговое кровообращение, как отмечается в [18], может явиться причиной мозгового инсульта.

Влияние на иммунную систему. НИ микроволновое облучение угнетает процессы иммуногенеза [20–23] и отягощает течение инфекционного процесса [24]. В опытах на животных получено, что микроволны

(интенсивность $0,05-0,5$ мВт/см²) обуславливают развитие специфических явлений аутоиммунитета [25].

Влияние на эндокринную и нейрогуморальную системы. НИ микроволны, как правило, стимулируют гипофизарно-адреналовую систему, что сопровождается увеличением содержания адреналина в крови, активацией процессов свертывания крови [26]. В работе [27] обнаружено кратковременное повышение уровня тироксина в сыворотке крови у крыс после их облучения микроволнами с интенсивностью 1 мВт/см².

Нарушения репродуктивной функции обычно связаны с изменением регуляторных параметров со стороны нервной и нейроэндокринной систем. Результаты экспериментальных исследований [28] указывают на наличие риска для здоровья женщин, подвергающихся НИ микроволновому облучению. Авторами [29] выявлено угнетение гормональной функции гонад у регулировщиков СВЧ-аппаратуры. Уровень тестостерона в крови у лиц обследованной группы был гораздо ниже, чем в контроле.

Влияние модулированных микроволн. Экспериментально показано, что воздействие на организм НИ микроволн, модулированных частотами мозга (альфа-диапазон электроэнцефалограммы человека) вызывает значительный биологический эффект [30].

«Слуховой эффект на СВЧ» получен при облучении людей-добровольцев в импульсном режиме [31]. В [32] рассмотрена физическая природа эффекта, состоящая в поглощении энергии ЭМ излучения и преобразовании ее в механическую в тканях головы, обладающей свойствами акустического резонатора, и передаче механических колебаний к улитке органа слуха посредством костной проводимости.

При совпадении частоты следования НИ СВЧ-импульсов с частотой сердечного цикла нарушается ритм сердцебиений [33].

Влияние на микроорганизмы, клетки и мембранные структуры. Исследование первичных звеньев реакции живых организмов на НИ ЭМ облучение удобно проводить на одноклеточных организмах и изолированных клетках, поскольку у этих живых систем реакция к внешним воздействиям не опосредована рецепторными механизмами, прежде всего, нервной системой. Сравнительно большое число работ на таких объектах выполнено в миллиметровом диапазоне длин волн. В 1970-х годах появилась серия публикаций, объединенных идеей о резонансном взаимодействии НИ миллиметрового излучения с собственными когерентными колебаниями в живых системах. (Их обзор представлен в монографии [34].) Например, в [35] сообщалось о наблюдении индукции

количина, характеризующейся «колоколообразной» зависимостью от частоты миллиметрового облучения. Однако, в [36] другой автор пишет о безрезультатности своих попыток воспроизвести, замеченное в [35], частотно-селективное влияние микроволн. (Обсуждение вопроса будет проведено ниже.)

Бактерицидное действие НИ миллиметровых волн (интенсивность $4,5 \text{ мВт/см}^2$) зафиксировано при облучении кишечной палочки и золотистого стафилококка [37]. Влияние миллиметрового облучения на скорость деления клеток наблюдается в экспериментах с культурой кишечной палочки ($\lambda = 2,2 \text{ мм}$; интенсивность $0,007 \text{ мВт/см}^2$). Процесс размножения клеток сильно ингибировался [38].

Общепринятыми являются соображения относительно решающей роли мембран в формировании биологического ответа, согласно которым, именно они определяют, в основном, реакцию клетки на внешнее воздействие. Эта роль биомембран в функционировании клеток различного типа и специализации осуществляется благодаря способности встраивать белки-рецепторы в оболочку клетки, организовывать водное пространство внутри и снаружи клетки, а также регулировать энергетические и биохимические процессы в клетке путем изменения диффузионных ограничений для ионов и других клеточных субстратов. Имеются публикации об увеличении после НИ СВЧ-облучения проницаемости эритроцитарных мембран для ионов калия [39] и других ионов [40], для диффузионного водного транспорта [41] и др.

Очевидно, вышеизложенные результаты свидетельствуют о возможности негативных последствий биологического влияния интенсивностей таких, сравнительно низких уровней, которые реализуются в обычных случаях облучения как для большинства населения городов, так и для многих профессионалов, работающих с ЭМ волнами по долгу службы.

Для правильного выбора средств защиты живого организма от неблагоприятного действия ЭМ полей необходимо исследовать первичные физико-химические механизмы процесса, уточнить подробности их влияния на основные компоненты клетки. На этой основе должна появиться возможность выяснить биологическую роль модуляции поля, разобраться в системных реакциях, которые и формируют окончательный биологический ответ организма.

3. Биофизические механизмы влияния низкоинтенсивных микроволн

Рассмотрение биофизических механизмов влияния низкоинтенсивных микроволн необходимо не только для создания более эффективных

средств защиты живых организмов, но и для понимания процессов, обеспечивающих полезные лечебные результаты, о которых сообщено в [34, 42–48].

В конце 1960-х годов появились первые работы о наблюдении существенного влияния НИ ЭМ волн миллиметрового диапазона [38]. Эти сообщения были встречены с недоверием. Действительно, температура биообъекта практически не изменилась; не мог быть реализован и разрыв молекулярных связей, т. к. энергия квантов излучения в этом диапазоне на несколько порядков меньше энергии самой слабой (водородной) связи. Однако тщательные исследования в СССР не только подтвердили реальную значимость таких воздействий [49], но и позволили установить присущие им особенности. Основным отличием биологического влияния волн миллиметрового диапазона от влияния других микроволн было наблюдение «резонансноподобных» эффектов. Авторы [35] опубликовали результаты в виде графиков с изображением острорезонансных зависимостей в координатах «длина волны — биологический ответ». Три группы американских ученых впоследствии наблюдали аналогичные частотно-зависимые эффекты [50–52]; отметим, однако, что двум другим научным группам в США подтвердить этот результат не удалось [53, 54].

Для объяснения «резонансноподобных» результатов в [35] предложена гипотеза [34], которая учитывает тот факт, что линейные размеры важнейших биологических структур (клетки, органеллы, крупные макромолекулы) по порядку величины составляют $\sim 10^{-7} - 10^{-8}$ м. Поскольку скорость распространения упругих колебаний (звука) в биосредах $V_{зв} \sim 10^3$ м/с, то указанные структуры могут резонировать в частотном интервале $10^{10} - 10^{11}$ Гц. Если принять, что эти «резонаторы» несут электрический дипольный момент, то возможна ситуация, когда внешние ЭМ микроволны обеспечивают возбуждение указанных естественных резонаторов. По нашему мнению, предложенная гипотеза малореалистична, поскольку биологические ткани представляют собой клеточные и другие структуры, погруженные в межклеточную жидкость. Такие среды обладают существенной вязкостью и, следовательно, в них реализуется значительное затухание механических движений. Из-за этого потери колебательной энергии в таких средах столь велики, что достаточно продолжительные механические движения с определенным периодом здесь отсутствуют; механические перемещения здесь могут описываться лишь сглаженной характеристикой релаксационного типа. Мы выполнили [55] тщательный анализ условий эксперимента [35] (и других подобных опытов), чтобы разобраться в причинах наблюдения авторами

колоколообразной («острорезонансной») кривой. Эту кривую авторы [35] получили благодаря тому, что тонкослойный биообъект (культура клеток) в их опытах помещался в ближней зоне рупорного излучателя. Согласно электродинамике антенн, ближняя зона характеризуется наличием нерегулярных осцилляций амплитуд напряженности ЭМ поля (т. н. «тонкая структура»). Перестройка частоты генератора приводит к пространственному смещению локализации упомянутых максимумов тонкой структуры. Поэтому при облучении неподвижного объекта сканируемыми частотами возникает ситуация, когда на тонкослойный объект на одной частоте попадает максимум интенсивности, на другой — меньшее значение, а на третьей — нулевое. В итоге, графическая зависимость биологического ответа от частоты облучающего поля имеет колоколообразный вид, что ошибочно интерпретируется как наличие резонансного эффекта [55].

Тем не менее, оставалось непонятным, почему вообще НИ миллиметровые волны (квант энергии которых на несколько порядков меньше энергии водородной связи) обладают способностью влиять на биообъекты. В целях продвижения вперед в понимании механизма влияния НИ ЭМ волн на клетку — наименьшую структурную единицу живого вещества, на кафедре биофизики РФФ было принято решение вначале детально исследовать физический механизм взаимодействия микроволн с основным компонентом живых систем — с водой.

Микроволны и жидкая вода. Прежде всего, мы обратили внимание на известное обстоятельство: в жидкой воде всегда присутствует растворенный воздух; поэтому в ней содержится и воздух в «свободном состоянии», т. е. в пузырьках. (Например, при 20°C и нормальном атмосферном давлении объемная доля «пузырькового» воздуха в воде составляет $V_F = 5,8 \cdot 10^{-8}$; средний радиус пузырьков $R_{cp} \approx 20$ нанометров [56].) С помощью специально разработанной методики с применением ядерного магнитного резонанса в [57, 58] получено, что НИ ЭМ волны, распространяясь в воде, обеспечивают рост размеров воздушных пузырьков. После прекращения ЭМ облучения пузырьки медленно (по диффузионному механизму) возвращаются к тому равновесному радиусу R_{cp} , который они имели до воздействия микроволн. Наблюдение этого, сравнительно продолжительного процесса восстановления свойств воды к «норме», иногда называют проявлением «памяти» воды [59].

Микроволны и примембранный водный слой клетки. Биологическую ткань (биосреду, биожидкость) можно, в определенном приближении, рассматривать как систему, состоящую из клеток и межклеточной жидкости. Оболочкой клетки является плазматическая

мембрана. Из гидродинамики известно, что любое тело, погруженное в жидкость, имеет пограничный слой, составленный из молекул жидкости. Такой пограничный слой окружает и клеточную мембрану: его называют водным примембранным диффузионным слоем. Частицы, движущиеся из межклеточной среды в клетку (и в противоположном направлении), могут проходить через указанный водный слой исключительно по диффузионному механизму. Согласно [60], толщина примембранного слоя на несколько порядков больше толщины липидного слоя мембраны. Поэтому время, требующееся частице для перемещения по диффузионному механизму из межклеточной жидкости в клетку (и в обратном направлении), в основном, затрачивается на преодоление примембранного водного слоя. Следовательно, толщина указанного слоя, в решающей мере, определяет скорость обмена веществ в системе «клетка — межклеточная жидкость», а значит и режим функционирования клетки.

Воздушные пузырьки, находящиеся в биоткани, конечно, присутствуют и в непосредственной близости к цитоплазматической мембране — в диффузионном примембранном водном слое. Пузырьки перемещаются в гравитационном поле (на них действует сила Архимеда; скорость движения конкретного пузырька в поле тяжести пропорциональна квадрату его радиуса) и в поле температурного градиента (реализуется т. н. термокапиллярный эффект; в этом поле скорость перемещения пузырька пропорциональна радиусу в первой степени). Двигаясь в примембранном диффузионном слое, пузырьки играют роль своеобразных миниатюрных «перемешивателей». Объективно, движущиеся пузырьки в определенной мере разрыхляют этот слой; чем активнее они перемещаются, тем выше уровень разрыхления примембранного диффузионного слоя, тем меньше его «эффективная толщина». Выше сообщалось, что воздушные пузырьки, оказавшись в поле электромагнитной волны, увеличиваются в размерах. Это обстоятельство приводит к более активному перемешиванию примембранного слоя; «эффективная толщина» его становится меньше, чем была до облучения волнами СВЧ. (В [61] получено, что 20-минутное облучение шестимиллиметровыми волнами (интенсивность 4 мВт/см^2) суспензии эритроцитов донорской крови человека уменьшает «эффективную толщину» примембранного водного слоя клеток на 11 %). Из-за этого процесс обмена веществ в системе «клетка-межклеточная среда» идет быстрее; следовательно, изменяется «стандартный» режим функционирования клетки. Такое отклонение режима функционирования клетки от «нормы», собственно, и является ее ответной реакцией на факт облучения низкоинтенсивными ЭМ волнами [62]. (Очевидно, обнаруженный на радиофизическом факультете «пузырьковый» первич-

ный механизм взаимодействия ЭМ волны низкой интенсивности с био-объектами, не является резонансным.)

Микроволны и живой организм. Живой организм представляет собой гармонизированный ансамбль органов, которые, в свою очередь, состоят из клеток. Очевидно, что изменяя с помощью НИ ЭМ облучения режим функционирования клеток определенного органа, появляется возможность управлять режимом как конкретного органа, так и организма в целом. Этим объясняются многочисленные примеры биологического влияния НИ микроволн на организм, приведенные в монографиях [15, 34, 40, 63]. В [64] получены результаты, позволяющие использовать НИ микроволны в качестве средства, эффективно снижающего степень поражения организма ионизирующей радиацией, уменьшающего тяжесть протекания лучевой болезни.

В последнее время в мировой научной литературе ежегодно появляется несколько тысяч статей по биологическому влиянию ЭМ полей. Тем не менее, перефразируя автора [63], необходимо сказать следующее. Сегодня работы в области биофизики ЭМ полей, в основном, выполняются за счет финансовых отчислений заинтересованных фирм-производителей оборудования, основанного на излучении ЭМ волн. Интерес этих организаций состоит в том, чтобы продемонстрировать безвредность, например, сотовых телефонов и бытового электрооборудования или, напротив, высокую лечебную эффективность некоторых биомедицинских ЭМ технологий. В обоих случаях имеется социальный заказ, который регламентирует область исследуемых ЭМ режимов довольно узкими границами. Ведущий научный журнал «Bioelectromagnetics» заполнен статьями по биологическим эффектам ЭМ полей только промышленных частот 50 и 60 Гц и некоторых гигагерцовых частот мобильной связи. Очевидно, что как конкретная практическая направленность социального заказа, так и его частотно-амплитудные ограничения не позволяют эффективно исследовать физическую природу биологических эффектов ЭМ полей.

Наконец, еще одна трудность связана с тем, что биофизика ЭМ полей, попадая, с одной стороны, одновременно в области компетенции физики и биологии, с другой стороны, не попадает целиком ни в одну из них. Это осложняет возможности для публикации статей, посвященных физическим аспектам влияния ЭМП. Журналы биологической направленности, как правило, испытывают вполне естественные затруднения с рецензированием статей по существу физического содержания. Именно так на их страницах появляются откровенно слабые статьи по механизмам биологических эффектов ЭМП. В то же время, физические журналы продолжают сохранять «традиционный» скептицизм относительно

возможности влияния низкоинтенсивных (слабых) ЭМ полей на биологические системы. Оппоненты-физики часто аргументируют отрицательное отношение только тем, что эффекты, объясняемые в рецензируемых статьях, известны своей невоспроизводимостью, поэтому предмета для обсуждения просто не может быть. Все же, физические журналы начинают публиковать позитивные работы по механизмам биологических проявлений ЭМП [65, 66]. К перечню приоритетных направлений исследований, на наш взгляд, следует отнести выполнение работ, обобщающих накопленный материал в области биофизики ЭМП, выдвижение реалистичных гипотез по биофизическим механизмам электромагниторецепции, разработку экспериментов по уточнению первичных механизмов преобразования ЭМ сигналов в сигналы биохимического уровня.

В 21-м веке во весь рост встала проблема эффективной защиты биосферы от техногенных электромагнитных полей [67]. Полученные на радиофизическом факультете результаты позволяют в подробностях проследить первичные биофизические механизмы взаимодействия ЭМ волн с живыми организмами, сформулировать на этой основе научно обоснованные рекомендации по снижению риска для населения в связи с растущим повсеместно электромагнитным загрязнением окружающей среды.

Литература

1. Данилевский В. Я. Исследования надъ физиологическимъ дѣйствіемъ электричества на разстояніи / В. Я. Данилевский — Х. : Зильберберг, 1900. — 104 с.
2. Слуцкий А. А. Получение колебаний в катодных лампах при помощи магнитного поля / А. А. Слуцкий, Д. С. Штейнберг // Журнал Российского физико-химического общества. — Серия физическая. — 1926. — Т. 58. — С. 595—602.
3. Полякова Н. Л. Дмитрий Аполлинарьевич Рожанский (1882-1936) / Н. Л. Полякова // Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского госуниверситета имени А. М. Горького. — 1953. — Т. 4. — С. 6—15.
4. Ткач В. К. Очерк развития радиофизики на физико-математическом факультете / В. К. Ткач // Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского госуниверситета имени А. М. Горького. — 1955. — Т. 5. — С. 93—102.
5. Костенко А. А. Создание в Харькове первого в Советском Союзе трехкоординатного радиолокатора дециметрового диапазона / А. А. Костенко, А. И. Носич // Радиофизика и электроника. — 1998. — Т. 3, № 3. — С. 7—32.

6. Брауде С. Я. Вплив високочастотного поля дециметрового діапазону на експериментальний рак щурів / С. Я. Брауде, П. П. Леяков, Л. М. Туткевич // *Експериментальна медицина*. — 1939. — № 2. — С. 66–73.
7. Ландау Л. Д. Электродинамика сплошных сред / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. — М. : Наука, 1982. — 620 с.
8. Малов М. М. Применение дециметровых волн в биологии и медицине / М. М. Малов, А. М. Обросов, Л. В. Фридман // *Физиотерапия*. — 1940. — № 1. — С. 24–44.
9. Roberts J. E. Microwaves in medical research / J. E. Roberts., H. F. Cook // *Brit. J. Appl. Phys.* — 1952. — V. 3, No. 1. — P. 33–56.
10. Schwan H. P. The absorbtion of electromagnetic energy in body tissues. Biophysical aspects / H. P. Schwan, G. M. Piersol // *Amer. J. Phys. Med.* — 1954. — V. 33, No. 2. — P. 371–399.
11. Kalant H. Physiological hazards of microwave radiation / H. Kalant // *Canad. Med. Ass. Journ.* — 1959. — V. 81, No. 4. — P. 575–602.
12. Пресман А. С. Биологическое действие микроволн / А. С. Пресман, Ю. И. Каменский, Н. А. Левитина // *Успехи современной биологии*. — 1961. — Т. 51, № 1. — С. 84–103.
13. Крылов В. А. Защита от электромагнитных излучений / В. А. Крылов, Т. В. Юченкова. — М. : Советское радио, 1972. — 216 с.
14. Минин Б. А. СВЧ и безопасность человека / Б. А. Минин. — М. : Советское радио, 1974. — 352 с.
15. Пресман А. С. Электромагнитные поля и живая природа / А. С. Пресман. — М. : Наука, 1968. — 288 с.
16. Гордон Э. В. Вопросы гигиены труда и биологического действия электромагнитных полей сверхвысоких частот / Э. В. Гордон. — М. : Медицина, 1966. — 265 с.
17. Лукьянова С. Н. Зависимость изменений суммарной биоэлектрической активности головного мозга от плотности потока энергии низкоинтенсивного микроволнового облучения / С. Н. Лукьянова, В. П. Макаров, В. В. Рынсков // *Радиационная биология. Радиоэкология*. — 1996. — Т. 36, № 5. — С. 706–709.
18. Justesen D. R. Microwave irradiation and the blood-brain barrier / D. R. Justesen // *Proc. IEEE*. — 1980. — V. 68, No. 1. — P. 60–67.
19. Зуев В. Г. Микроволны и гематоэнцефалический барьер / В. Г. Зуев, И. Б. Ушаков // *Радиационная биология. Радиоэкология*. — 1993. — Т. 33, № 5. — С. 739–747.
20. Рудаков И. А. Влияние неионизирующей микроволновой радиации на показатели клеточного иммунитета / И. А. Рудаков, Г. И. Виноградов, М. И. Руднев. // *Врачебное дело*. — 1985. — № 4. — С. 96–99.

21. Богомолов В. М. Иммуностимулирующий эффект микроволн при воздействии на зону проекции вилочковой железы у кроликов / В. М. Богомолов, И. Д. Френкель, С. Б. Першин // Вопросы курортологии, физиотерапии и ЛФК. — 1987. — № 1. — С. 12–14.

22. Першин С. Б. Иммуномодулирующий и иммунореабилитирующий эффекты микроволновых воздействий / С. Б. Першин, И. Д. Френкель // Иммунодефицит и аллергия. — М.: Медицина. — 1986. — С. 178–179.

23. Шандала М. Г. Влияние микроволнового облучения на некоторые показатели клеточного иммунитета в условиях хронического действия / М. Г. Шандала, Г. И. Виноградов, М. И. Руднев // Радиобиология. — 1983. Т. 23, № 4. — С. 544–546.

24. Мамыкина В. М. Течение экспериментальной стафилококковой инфекции в условиях влияния высокочастотных электромагнитных колебаний / В. М. Мамыкина, В. В. Гузеев // Актуальные вопросы постреанимационного периода. — Саранск : Изд-во Мордовск. мед. ин-та, 1982. — С. 70–72.

25. Виноградов Г. И. Влияние неионизирующей микроволновой радиации на аутоиммунные реакции и антигенную структуру сывороточных белков / Г. И. Виноградов, Г. В. Батанов, Г. М. Науменко // Радиобиология. — 1985. Т. 25, № 6. — С. 840–843.

26. Michaelson S. V. Biological effects and health implications of radiofrequency radiation / S. V. Michaelson, I. C. Lin. — N.-Y., London : Plenum Press, 1987. — 675 p.

27. Lu S. T. Thermal and endocrinological effects of protected irradiation of rats by 2450 MHz microwaves / S. T. Lu, N. Lebla. // Radio science. — 1977. — V. 12, Suppl. — P. 147–156.

28. Козырин И. П. Сравнительная характеристика биологического действия ЭМП сверхвысокой и промышленной частоты / И. П. Козырин, Н. И. Швайко // Гигиена и санитария. — 1988. — № 7. — С. 11–13.

29. Никитина В. Н. ЭМП радиочастотного диапазона — фактор риска нарушений мужской репродуктивной системы / В. Н. Никитина, Т. И. Устинкина, Е. С. Шапошникова // I Российская конференция. «Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундаментальные и прикладные исследования» — Москва. — 1996. — С. 36.

30. Adey W. R. Frequency and power windowing in tissue interactions with weak electromagnetic fields / W. R. Adey // Proc. IEEE. — 1980. — V. 68, No 1. — P. 119–125.

31. Frey A. Human auditory system response to modulated electromagnetic energy / A. Frey // J. Appl. Physiology. — 1967. — V. 23, No 6. — P. 67–73.

32. Тигранян Р. Э. Частотный диапазон слухового эффекта СВЧ / Р. Э. Тигранян, В. В. Шорохов. // Биофизика. — 1988. — Т. 33, № 2. — С. 349–350.
33. Африканова Л. А. Влияние электромагнитного излучения различных режимов на сердечную деятельность (в эксперименте) / Л. А. Африканова, Ю. Г. Григорьев // Радиационная биология. Радиозэкология. — 1996. — Т. 36, № 5. — С. 691–699.
34. Девятков Н. Д. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности / Н. Д. Девятков, М. Б. Голант, О. В. Бецкий. — М. : Радио и связь, 1991. — 168 с.
35. Смолянская А. З. Действие электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн на биологические объекты / А. З. Смолянская, Р. Л. Виленская // УФН. — 1973. — Т. 110, № 3. — С. 458–460.
36. Arber S. L. Cell effects of microwave electromagnetic fields / S. L. Arber // *Physiol. and phys. and med.* — 1986. — V. 18, No 1. — P. 49–50.
37. Кондратьева В. Ф. Бактерицидное действие электромагнитных волн миллиметрового диапазона / В. Ф. Кондратьева, Е. Н. Чистякова, И. Б. Иванова, А. Д. Казанская // Труды Ленинградского хим.-фарм. ин-та. — 1967. — Т. 20, № 1. — С. 83–87.
38. Webb S. J. Inhibition of bacterial cell growth by the 136 Gc microwave / S. J. Webb, D. D. Dodds // *Nature.* — 1968. — V. 218, — P. 374–375.
39. Jaggard D. I. Cellular effects: millimeter waves and Raman spectra — report of a panel discussion / D. I. Jaggard, J. L. Lords // *Proc. IEEE.* — 1980. — V. 68, No 1. — P. 114–119.
40. Исмаилов Э. Ш. Биофизическое действие СВЧ излучений / Э. Ш. Исмаилов. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 143 с.
41. Емец Б. Г. Влияние лекарственных препаратов на степень изменения водной проницаемости эритроцитарных мембран, обусловленного миллиметровым облучением / Б. Г. Емец // Тезисы доклада на 6-м Всесоюзном семинаре «Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине» — Москва : ИРЭ АН СССР. — 1986. — С. 51–52.
42. Балакирева Л. З. Применение волн мм диапазона для лечения хронических язв гастродуоденальной зоны / Л. З. Балакирева, М. Б. Голант, А. А. Головатюк и др. // *Электронная промышленность.* — 1985. — № 1. — С. 9–10.
43. Девятков Н. Д. Влияние излучения мм диапазона на эффективность трансплантации костного мозга / Н. Д. Девятков, Л. А. Севастьянова, Э. С. Зубенкова и др. // *Радиобиология.* — 1988. — Т. 28, № 3. — С. 361–364.
44. Запорожан В. Н. Влияние мм волн на показатели выздоровления после радикальных операций у гинекологических больных / В. Н. Запорожан,

Т. Б. Реброва, О. В. Хаит и др. // Медико-биологические аспекты миллиметрового излучения. — М. : ИРЭ АН СССР. — 1987. — С. 21–24.

45. Ганелина И. Е. Опыт применения мм излучения низкой интенсивности в комплексной терапии больных ишемической болезнью сердца, страдающих тяжелой стенокардией / И. Е. Ганелина, Т. А. Степанова, В. А. Корнеев // Миллиметровые волны в медицине. — М. : ИРЭ АН СССР. — 1991. — Т. 1. — С. 40–47.

46. Семенова С. В. Влияние электромагнитного излучения мм диапазона на функциональное состояние системы гомеостаза у больных инфарктом миокарда: автореф. дис... канд. мед. наук. / С. В. Семенова. — Саратов : Саратовск. гос. мед. ун-т, 1994. — 25 с.

47. Шевченко С. Д. Опыт лечения электромагнитным излучением миллиметрового диапазона нетепловой интенсивности некоторых ортопедических заболеваний / С. Д. Шевченко, В. И. Маколинец, Г. Х. Грунтовский и др. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1996. — № 8. — С. 69–70.

48. Целкунова И. Г. Влияние миллиметровой терапии на гемостаз и реологические свойства крови у больных нестабильной стенокардией: диссертация на соискание ученой степени кандидата медицинских наук. — М. : Российский государственный мед. ун-т, 1996. — 130 с.

49. Научная сессия Отделения общей физики и астрономии АН СССР (17–18 января 1973 г.) // УФН. — 1973. — Т. 110, № 3. — С. 452–469.

50. Hill D. W. Effect of millimeter waves on bacteria and viruses / D. W Hill, M. J. Hagmann, A. Riazii // Abstract of scientific papers open symposium on the biological effects of millimeter waves. 19 General assembly of URSI. — Helsinki, 1978. — P. 34.

51. Motzkin S. Millimeter wave CW cells irradiation studies. Microwave aspects. Colicin induction in E. coli / S. Motzkin, L. Birenbaum, S. Rosental // Abstracts of bioelectromagnetic symposium of URSI meeting. — Seattle. — 1979. — P. 460.

52. Webb S. J. Factors affecting the induction of lambda prophages by millimeter microwaves / S. J. Webb // Phys. Letters. — 1979. — V. 73 A, No 2. — P. 145–148.

53. Swicord M. L. Colicin induction by exposure to millimete-wave radiation / M. L. Swicord, T. W. Athey, F. L. Buchta // Abstract of scientific papers open symposium on the biological effects of millimeter waves. 19 General assembly of URSI. — Helsinki. — 1978. - P. 35.

54. Adey W. R. Tissue interactions with ionizing electromagnetic fields/ W. R. Adey // Physiol. Rev. — 1981. — V. 61, No 2. — P. 435–514.

55. Емец Б. Г. О возможных причинах наблюдения «резонансного» действия электромагнитного излучения сверхвысоких частот на биообъекты /

Б. Г. Емец // Вісник Харківського державного університету. — № 410. Біофізичний вісник. — 1998. — Вип. 1. — С. 133–37.

56. Емец Б. Г. Определение методом ядерного магнитного резонанса средних размеров и концентрации воздушных пузырьков, содержащихся в воде / Б. Г. Емец // Письма в ЖТФ. 1997. — Т. 23, № 13. — С. 42–45.

57. Емец Б. Г. Замедленная релаксация жидкостей / Б. Г. Емец // Журнал физической химии. 1992. — Т. 66, № 7. — С. 1994–1995.

58. Емец Б. Г. О поведении газовых включений в воде, подвергнутой низкоинтенсивному СВЧ-облучению / Б. Г. Емец // Доповіді НАН України. — 1998. — № 11. — С. 80–83.

59. Емец Б. Г. Замедленная релаксация водных растворов, подвергнутых электромагнитному воздействию / Б. Г. Емец // Журнал физической химии. — 1997. — Т. 71, № 6. — С. 1143–1145.

60. Котык А. Мембранный транспорт / А. Котык, К. Яначек. — М. : Мир, 1980. — 341 с.

61. Емец Б. Г. Эффекты взаимодействия низкоинтенсивных электромагнитных волн с наноразмерными газовыми включениями в жидких средах : дис. ... докт. физ.-мат. наук: спец. 01.04.09 / Б. Г. Емец. — Х. : ХНУ им. В. Н. Каразина, 2004. — 233 с.

62. Емец Б. Г. О физическом механизме влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения на биологические клетки / Б. Г. Емец // Биофизика. — 1999. — Т. 15, № 3. — С. 555–558.

63. Бинги В. Н. Принципы электромагнитной биофизики / В. Н. Бинги. — М. : ФИЗМАТЛИТ, 2011. — 592 с.

64. Алмазова Е. Б. Микроволны изменяют сопротивляемость живых организмов по отношению к ионизирующей радиации / Е. Б. Алмазова, Б. Г. Емец // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2012. — № 4/9 (58). — С. 19–23.

65. Binhi V. N. , Savin A. V. Molecular gyroscopes and biological effects of weak extremely low-frequency magnetic fields / V. N. Binhi, A. V. Savin // Phys. Rev. — 2002. — 65, (051912).

66. Бинги В. Н., Савин А. В. Физические проблемы действия слабых магнитных полей на биологические системы / В. Н. Бинги, А. В. Савин // УФН. — 2003. — Т. 173, № 3. — С. 265–300.

67. Григорьев О. А. Электромагнитная безопасность городского населения: характеристика современных источников ЭМП и оценка их опасности / О. А. Григорьев // «Электромагнитные поля и население : сборник статей / под общ. ред. проф. Ю. Г. Григорьева. — М. : Изд-во РУДН, 2003. — С. 76–93.