

УДК 532.616

МЕДИЦИНСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И ОБЪЕКТЫ: ОТ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ЭКСПЕРИМЕНТУ

С. Г. ГАЛСТЯН, И. Г. ПЕРОВА, Г. И. ЧУРЮМОВ

В настоящей работе проведен анализ экспериментальных и теоретических исследований воздействия электромагнитного излучения на биологические системы и объекты живой природы. Рассматриваются особенности и специфика теплового (мощность излучения более 10 Вт) и нетеплового (информационного) (мощность излучения менее 1 Вт) применения электромагнитной энергии в лечебных целях. Приводятся варианты построения математических моделей электромагнитного поля и биологических систем на основе самосогласованных систем дифференциальных уравнений в частных производных для электромагнитного поля (уравнения Максвелла, волновое уравнение) и уравнения теплопроводности. Получила дальнейшее развитие математическая модель противобактериального иммунного ответа с учетом действия внешнего электромагнитного поля. Рассмотрено применение связанных дифференциальных уравнений первого порядка для моделирования процесса воздействия электромагнитного поля на фазовые биологические объекты крови.

Ключевые слова: электромагнитное поле, биологическая система, математическая модель, тепловое воздействие, информационное воздействие, микроволновая диагностика.

ВВЕДЕНИЕ

Результаты воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ) на объекты и среды биологической природы и последствия такого воздействия имеют широкое практическое применение [см., напр., 1–3]. Актуальность данных вопросов не вызывает сомнений, так как востребована всем прогрессом развития новых методов диагностики и лечения различных заболеваний [4].

В основе воздействия ЭМИ на биологические системы лежит эффект преобразования энергии электромагнитного поля (ЭМП) в другие виды энергий, в частности, в тепловую (тепловое воздействие) [1, 4], а также стимулирование жизнедеятельности организмов внешним ЭМИ и установления закономерностей электромагнитной связи между организмами (нетепловое или информационное воздействие) [1, 5, 6]. Это открывает новые возможности в биологии [7] (квантовая биология [8]), медицине [9] (квантовая медицина [10]), биофизике, сельском хозяйстве и других областях науки.

Рассматривая влияние ЭМИ на биологические системы, в частности, на организм человека, следует отметить, что условия распространения и характер взаимодействия ЭМП с биологическими объектами существенно меняются в зависимости от частоты и интенсивности излучения [11].

На рис. 1 схематично представлены задействованные частоты ЭМИ для различных терапевтических применений из полного спектра электромагнитных колебаний. Следует отметить, что в выбранных для применения диапазонах частот задействованы лишь отдельные частоты, применение которых согласовано с

Международной комиссией по радиочастотам для промышленного, бытового и медицинского применений.

Анализ воздействия ЭМИ на биологические системы можно охарактеризовать как тепловое (или высокоэнергетическое действие) и информационное (низкоэнергетическое действие). В случае высокоэнергетического действия ЭМИ (с интенсивностью поля более 100 В/м или мощности излучения более 10 Вт) начинают заметно проявляться тепловые эффекты, благодаря процессу преобразования электромагнитной энергии во внутреннюю энергию объектов различной биологической структуры, что вызывает повышение их температуры. Это позволяет использовать электромагнитную энергию в терапевтических целях для нагревания пораженных тканей (длинноволновая, коротковолновая и СВЧ диатермия или микроволновая терапия [4]) и лечения онкологических заболеваний (гипертермия [12]). В этом случае речь идет о применении свойства поглощения электромагнитной энергии в живых тканях для контролируемого и временного повышения температуры тела, отдельного органа или части органа, поражённого патологическим процессом, свыше 39 °С до 42 °С.

В работах [4, 12] осуществлен обзор применения существующих методов термической терапии в медицине (диатермия и гипертермия), возможных биологических эффектов от теплового воздействия ЭМИ различной длины волны, схем и конструкций аппаратуры для практической реализации такого воздействия.

В последнее время методы гипертермии эффективно и широко применяются в онкологии. В частности, в [13] рассматривается современ-

ное состояние проблемы применения гипертермии в клинической онкологии. Отмечаются позитивные результаты применения гипертермии на основании экспериментальных работ и исследований европейских ученых. В работе рассматриваются позитивные аспекты применения гипертермии. При температуре 39–41 °С в тканях организма активируется микроциркуляция, усиливаются питание и метаболизм клеток и тканей, ускоряется проводимость в периферических нервах, снижается тонус мышц. Также в [13] отмечена реактивация хронического воспаления, которое становится острым, что инициирует процессы самовосстановления в организме, в частности, восстановление нормальных иммунных реакций.

В случае использования ЭМИ низкой интенсивности (с интенсивностью поля менее 10 В/м и мощностью менее 1 Вт) имеет место особый процесс взаимодействия ЭМП с биологическими средами и объектами, который протекает без заметного увеличения средней кинетической энергии составляющих их молекул (объектов). Такое воздействие ЭМП на биологические среды и объекты (например, отдельные клетки) в литературе определяется как специфическое или информационное действие, которое имеет явно выраженную биологическую эффективность и вызывает изменение функционального состояния физиологической системы на клеточном и молекулярном уровнях [1, 3, 5–10]. В его основе лежит гипотеза о резонансном взаимодействии ЭМИ

КВЧ диапазона с биологическими системами, сопровождающими механизм обмена энергией между ЭМП и биологическими системами с различной молекулярной организацией внутренней структуры. С другой стороны, не менее важным моментом информационного воздействия на биологические объекты является учет модуляционно-временных параметров воздействующего ЭМИ, что позволяет рассматривать такой процесс как передачу информации между ЭМП и биологической системой (среда и ее дискретные объекты) или внутри самой системы (между отдельными объектами системы) [1, 3]. В этом процессе для повышения стимулирующего фактора от воздействия ЭМИ следует определить зависимость биологической эффективности излучения КВЧ диапазона от его интенсивности и частоты, подбирая экспериментально для каждого конкретного случая «амплитудные» и «частотные» окна, вид и форму модулирующего сигнала для управления процессами, протекающими в биологической системе [11, 14].

Достаточно подробно вопросы информационного воздействия ЭМИ КВЧ диапазона на живые организмы исследовались в работах, выполненных в НИИ «Исток» (г. Фрязино) под руководством акад. Девяткова Н.Д. Данные результаты являются наиболее фундаментальными и составляют основу современных разработок в этом направлении. Так, в работе [3] отмечается, что энергия квантов КВЧ диапазона, с одной стороны, меньше кинетической энергии теплового движе-

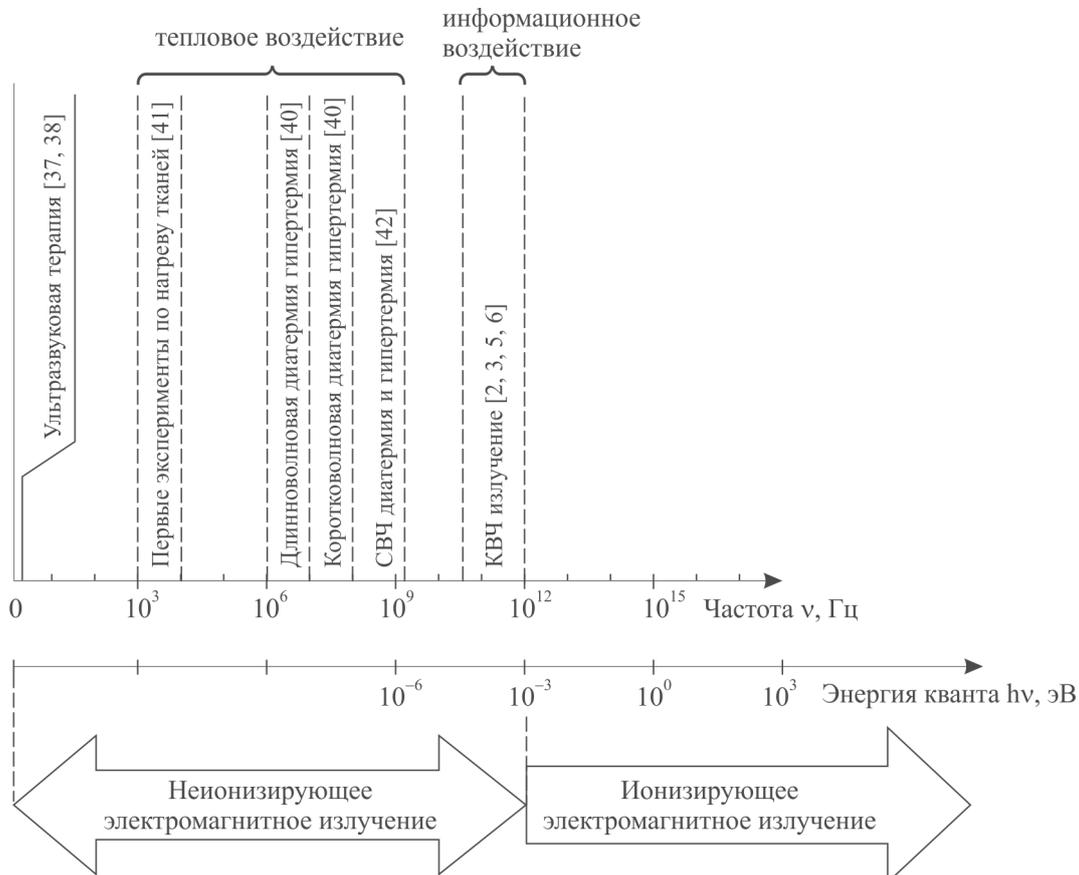


Рис. 1. Схема использования спектра электромагнитных колебаний в медицинских целях

ния атомов и молекул, приходящуюся на одну степень свободы $E_T = kT$, где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана, $T = 293,15$ К – комнатная температура по шкале Кельвина, а с другой – много меньше энергии даже слабых водородных связей в живых организмах. Отсутствие повреждающего действия на организм в совокупности с большой информативной емкостью может благоприятствовать использованию рассматриваемых диапазонов волн живыми организмами для связи и управления при невысоком уровне мощности управляющих сигналов.

На рис. 2 представлена структурная схема одной из типичных лабораторных установок для воздействия ЭМИ на живые организмы [3].

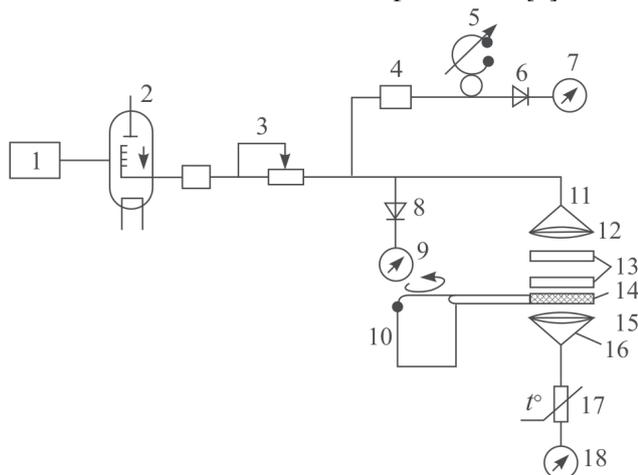


Рис. 2. Схематическое изображение установки для воздействия ЭМ излучения на живые организмы [3]:

- 1 – блок питания; 2 – лампа обратной волны;
- 3 – ослабитель; 4 – измерительная линия;
- 5 – волномер; 6, 8 – детекторные головки;
- 7 – стрелочный прибор; 9 – измеритель мощности падающего излучения; 10 – электромотор, вращающий и перемешивающий среду (в некоторых экспериментах с микроорганизмами);
- 11, 16 – рупоры; 12, 15 – корректирующие линзы;
- 13 – трансформатор; 14 – объект; 17 – термисторная головка; 18 – измеритель мощности проходящего излучения

Особо следует отметить исследования, направленные на изучение влияния физических полей и, в частности, ЭМИ на кровь и ее форменные образования (эритроциты, лейкоциты, тромбоциты). Так, в работе [15] рассматривается роль КВЧ излучения в повышении биологической активности крови, что приводит к улучшению неврологического состояния больных, уменьшению агрегативности тромбоцитов и активизации антиоксидантной системы при облучении крови на длине волны 7,1 мм.

В экспериментальной работе [16] описываются электрические и магнитные свойства форменных элементов крови одного вида – эритроцитов. На основе кулоновского взаимодействия представлены приближенные модели электростатического взаимодействия эритроцитов в кровотоке, которое возникает между двумя заря-

женными частицами, а также описывается приближенная модель магнитного взаимодействия эритроцитов в кровотоке и гигроскопические эффекты, возникающие при движении эритроцитов.

Изучение воздействия ЭМИ и парамагнитных частиц на эритроциты проводилось в работе [17], в которой представлена экспериментальная установка для облучения эритроцитов ЭМИ с плотностью мощности 0,6 мВт/см² и частотой 418 МГц (рис. 3).

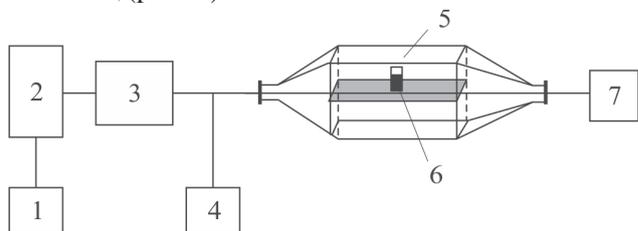


Рис. 3. Система для электромагнитной экспозиции:

- 1 – источник питания; 2 – генератор СВЧ;
- 3 – устройство согласования; 4 – измеритель СВЧ мощности; 5 – СВЧ резонатор; 6 – исследуемый образец; 7 – измеритель прошедшей СВЧ мощности

Вопросы влияния низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона на процессы микроциркуляции крови у человека и животных (крыс), а также возможные механизмы этого влияния подробно рассмотрены в [25, 28]. Практический интерес к полученным результатам важен и состоит в том, что кровь объединяет и связывает между собой многие органы, обеспечивающие жизнедеятельность организма человека. Исследования системы крови, которая включает непосредственно кровь, органы кроветворения и кроверазрушения, связана с успехами, полученными на молекулярном уровне, в области фундаментальной иммунологии, гематологии, биологии и биофизики. Учет воздействия низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона на систему крови и понимание механизма такого действия на форменные ее элементы позволяет по-новому подойти к терапии ряда заболеваний системы крови, а также многих других заболеваний.

Необходимо отметить, что существующая практика исследования воздействия ЭМИ КВЧ диапазона на различные биологические системы и объекты живой природы применяет, в основном, эмпирический метод исследования. Учитывая сложность и неоднозначность изучаемых явлений и процессов, протекающих при взаимодействии ЭМИ с биологическими системами, возникает необходимость в более углубленных теоретических исследованиях и, в частности, применение математических моделей и моделирования для описания и изучения биофизических процессов, происходящих на различных уровнях организации живого организма. Объединение теории и экспериментальных исследований позволяет получать объективные и достоверные результаты, из которых путем обобщения можно устанавливать общие закономер-

ности взаимодействия ЭМП с биологическими системами и объектами, подтверждать или опровергать основные положения выдвинутых ранее гипотез и концепций. Такой подход также служит основой для постановки и ускорения новых клинических исследований, разработки и внедрения в медицинскую практику серии новых приборов и аппаратов для диагностики и терапии различных заболеваний. На этом пути существует ряд ограничений, связанных с развитием и применением экспериментальных методов исследования. В частности, одной из таких экспериментальных проблем является существующий ограниченный доступ к использованию частотного диапазона, а также довольно небольшой выбор вакуумных и твердотельных приборов СВЧ, которые обеспечили бы необходимый уровень выходной мощности в указанных областях частотного спектра и необходимую стабильность частоты генерации. Необходимо отметить важность параметра стабильности частоты, так как от его величины зависит уровень неконтролируемой модуляции несущей частоты и возможные закономерности ее изменения. Все это усиливает позиции и роль метода математического моделирования как мощного инструмента теоретического исследования биофизических процессов, происходящих на различных уровнях организации биологических систем при их взаимодействии с ЭМИ с прогнозируемыми законами изменения амплитуды и частоты.

В работах [18, 19] отмечаются важность применения математических методов и моделей, использования вычислительного эксперимента как инструмента для изучения биологии клетки, автоволновых процессов, которые возбуждаются в сильно нелинейных биологических средах и математического моделирования пространственной организации макромолекул, макромолекулярных комплексов и внутриклеточных структур, а также различных биохимических реакций, происходящих в организме человека.

При построении математических моделей воздействия ЭМИ на биологические системы, как показано в работах [20-23], следует исходить из особенностей выбора и использования математического аппарата для описания биологических процессов и реакций. Для этого необходимо понимание и оценка биологической проблемы, адекватного математического представления и формализации принципиально важных биологических явлений, а также биологической интерпретации полученных медико-биологических результатов моделирования. Одним из удачных таких примеров является подход к разработке математических моделей в иммунологии, предложенный акад. Марчуком Г.И. и подробно представленный в монографии [23]. При этом иммунная система человека рассматривается как своеобразный барьер, препятствующий размножению и поражению организма человека раз-

личными патогенными микроорганизмами или антигенами (вирусами, бактериями, грибами) и таким образом защищающий организм от разрушающего воздействия внешних факторов. В качестве основной разновидности иммунитета рассматривается гуморальный иммунитет (защитные функции выполняют молекулы, находящиеся в плазме крови), связанный с борьбой организма с патогенными антигенами путем выработки антител, специфичных к заболеванию. В этом случае, как показано в [23], процесс образования антител связан с работой трех типов клеток: макрофага, В-лимфоцита и Т-лимфоцита. Главной клеткой, подающей антиген лимфоцитам, является макрофаг. Антигены V, встречаясь с макрофагами М, поглощаются ими, перерабатываются, после чего макрофаги формируют набор из антигенных детерминант на своей поверхности. Схематическое изображение данного процесса представлено на рис. 4.

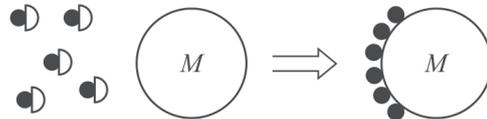


Рис. 4. Формирование набора антигенных детерминант на поверхности макрофага

Макрофаги М подают этот набор В-лимфоцитам, в результате чего происходит связывание антигенных детерминант с поверхностными рецепторами В-лимфоцитов иммуноглобулиновой природы. Данный механизм представлен на рис. 5.

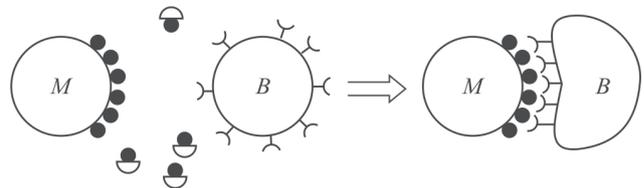


Рис. 5. Презентирование макрофагами детерминант В-лимфоциту

В присутствии T_H – помощника, активированного антигеном происходит стимуляция В-лимфоцита, который начинает делиться и дифференцироваться в сторону плазматических клеток, как показано на рис. 6.

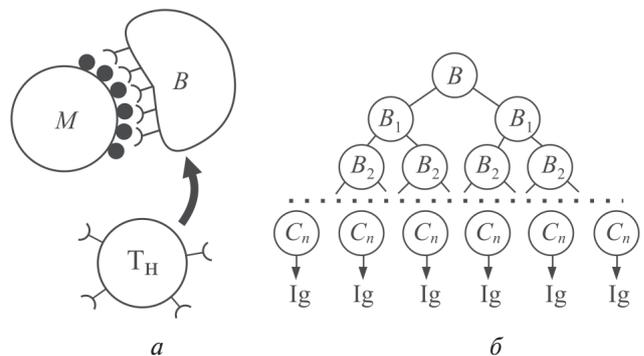


Рис. 6. Схема процесса стимуляции В-лимфоцита (а) и схема каскадного процесса делений и образования клона плазматических клеток (б)

Такой каскадный процесс образования клона плазматических клеток длится от нескольких часов до нескольких дней.

Рассмотренная физиологическая модель механизма иммунной реакции организма и выработка антител, специфичных к заболеванию, позволяет представить модель противобактериального иммунного ответа в виде системы связанных дифференциальных уравнений первого порядка с запаздывающим аргументом [23]:

1. Уравнение баланса для числа бактерий

$$\frac{dV}{dt} = (\beta - \gamma F)V. \quad (1)$$

2. Уравнение баланса для плазматических клеток

$$\frac{dC}{dt} = \xi(m)\alpha V(t - \tau)F(t - \tau) - \mu_c(C - C^*). \quad (2)$$

3. Уравнение для антител

$$\frac{dF}{dt} = \rho_F C - (\mu_f + \eta V)F. \quad (3)$$

4. Уравнение для характеристики состояния пораженного органа

$$\frac{dm}{dt} = \sigma V - \mu_m m, \quad (4)$$

где $V(t)$ – концентрация патогенных размножающихся антигенов; $C(t)$ – концентрация плазматических клеток; $F(t)$ – концентрация антител; $m(t)$ – относительная характеристика пораженного органа; β – коэффициент размножения антигенов; γ – коэффициент, определяющий вероятность нейтрализации антигена антителами при встрече с ним; $m = 1 - M'/M$; M – характеристика здорового органа (масса или площадь); M' – соответствующая характеристика здоровой части пораженного органа; $\xi(m)$ – функция, характеризующая работоспособность иммунологических органов в зависимости от тяжести болезни; α – коэффициент, учитывающий вероятность встречи антиген–антитело, возбуждение каскадной реакции и число образующихся новых клеток; μ_c – коэффициент, равный обратной величине их времени жизни; ρ_F – скорость производства антител одной плазматической клеткой; μ_f – коэффициент, обратно пропорциональный времени распада антител; η – количество антител, которое требуется для нейтрализации одного антигена; σ – константа, которая характеризует заболевание; μ_m – коэффициент, характеризующий обратную величину периода восстановления органа в e раз.

В качестве начальных условий для решения исходной системы уравнений (1) – (4) при $t = t_0$ исходим из предположения, что $V(t) = 0$ при $t < t_0$, т.е. до момента заражения при $t = t_0$ вирусы в организме отсутствовали. Тогда, окончательно начальные условия имеют вид

$$V(t_0) = V_0; C(t_0) = C_0; F(t_0) = F_0; m(t_0) = m_0. \quad (5)$$

Представленная система нелинейных дифференциальных уравнений (1) – (4) с начальными условиями (5) представляет простейшую математическую модель заболевания. Использование созданной математической модели дает возможность понять особенности механизма поражения и построить оптимальный алгоритм лечения различных инфекционных заболеваний (например, вирусного гепатита С, деструктивной пневмонии и гриппозной инфекции [23]).

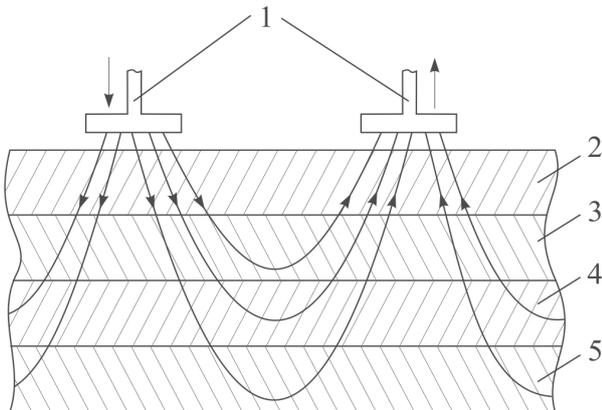
В настоящей статье на основе обобщения результатов построения физических и физиологических моделей различных заболеваний организма человека развивается подход к построению математических моделей, описывающих эволюционный цикл изменений, происходящих в организме человека при воздействии разнообразных внешних факторов на макро- и микроуровнях строения материи, включая воздействие патогенных микроорганизмов и ЭМИ различной интенсивности и частоты (СВЧ и КВЧ диапазоны).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассмотрим общую постановку задачи воздействия ЭМИ на биологические системы и объекты. Обобщение практического опыта многолетних эмпирических исследований позволило определить основные схемы, реализующие механизм электромагнитного воздействия (рис. 7). В зависимости от частоты и интенсивности ЭМП и особенностей биологического объекта (размера, формы и состояния) применяются различные схемы возбуждения ЭМП для получения оптимального его распределения. Это могут быть излучатели (антенны) в виде аппликаторов, которые накладываются на тело человека или располагаются вблизи него (рис. 7, а). Места расположения таких излучателей и их количество рассчитываются таким образом, чтобы создавать максимум интенсивности ЭМП в месте расположения очага заболевания внутри или на поверхности тела человека. Такие схемы применяются при термическом варианте для терапевтического применения (различные виды диатермии [4]) и лечения некоторых видов онкологических заболеваний (гипертермия [12]). В этом случае частоты ЭМИ соответствуют десяткам и сотням МГц, а их выбор зависит от глубины расположения очага заболевания. С ростом частоты ЭМП (до 10 ГГц) и его интенсивности (мощность более 10 Вт) целесообразно использовать резонаторные системы, в которых формируется поле с заданным распределением (рис. 7, б).

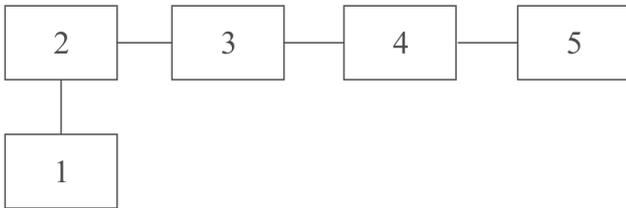
В КВЧ и терагерцовом диапазонах ввиду малости геометрические размеров волноведущих структур применяется открытый способ облучения биологических систем с помощью специальных типов излучателей (рупорные антенны) (рис. 7, в). В этом случае в качестве исследуемых

образцов могут рассматриваться либо отдельные части и органы тела человека или отдельные биологические объекты (клетки живой материи или различные патогенные микроорганизмы).



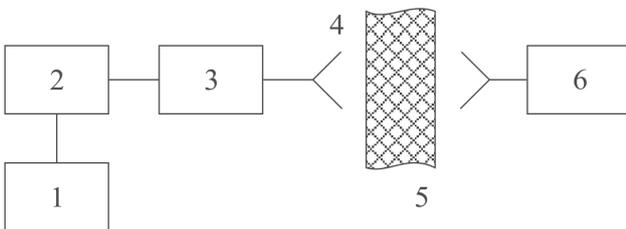
1 – излучатели ЭМП; 2 – кожный покров;
3 – жировой слой; 4 – мышечный слой;
5 – костные образования

а



1 – источник питания; 2 – генератор СВЧ;
3 – устройство согласования; 4 – СВЧ резонатор;
5 – измеритель прошедшей СВЧ мощности

б



1 – источник питания; 2 – генератор СВЧ;
3 – устройство согласования; 4 – СВЧ излучатель;
5 – исследуемый образец; 6 – измеритель
прошедшей СВЧ мощности

в

Рис. 7. Схемы воздействия ЭМИ на биологические системы

Анализ представленных схем показывает, что для адекватного понимания биологической проблемы и математического описания природы биологического воздействия ЭМИ следует решить две основные задачи. С одной стороны, рассматривается электродинамическая задача возбуждения ЭМП с выбирается требуемое распределение поля [26], а с другой – непосредственно биологическая среда и ее представление на макро- или микроуровнях с определением соответствующих электрофизических и биофизических параметров [27].

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Для воздействия ЭМИ на биологические системы и объекты используется широкий диапазон длин волн: от акустических до волн радио и СВЧ диапазонов и далее до КВЧ и терагерцового диапазонов (рис. 1). Основными параметрами ЭМВ, которая распространяется в вакууме, являются длина волны λ и ее частота f . При распространении ЭМВ в произвольной среде данные параметры связаны между собой соотношением

$$\lambda = \frac{1}{f \cdot \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon(\vec{r}, t) \mu(\vec{r}, t)}} = \frac{c}{f \cdot \sqrt{\epsilon(\vec{r}, t) \mu(\vec{r}, t)}}, \quad (6)$$

где $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – скорость света; $\epsilon_0 = \frac{10^{-9}}{36\pi}$ – диэлектрическая постоянная вакуума (Ф/м); $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная вакуума (Гн/м); $\epsilon(\vec{r}, t)$ и $\mu(\vec{r}, t)$ – относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости.

Для определения распределения напряженностей ЭМП в биологической среде со сложной макроструктурой следует воспользоваться полной системой уравнений Максвелла, которая может быть представлена в виде уравнений Максвелла для вихревого ЭМП:

$$\nabla \times \vec{H}(\vec{r}, t) - \frac{\partial \vec{D}(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{J}_{\text{стор}}, \quad (7)$$

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{\partial \vec{B}(\vec{r}, t)}{\partial t} \quad (8)$$

и материальных уравнений для среды:

$$\vec{D}(\vec{r}, t) = \epsilon_0 \cdot \epsilon(\vec{r}, t) \cdot \vec{E}(\vec{r}, t), \quad (9)$$

$$\vec{B}(\vec{r}, t) = \mu_0 \cdot \mu(\vec{r}, t) \cdot \vec{H}(\vec{r}, t), \quad (10)$$

где $\vec{E}(\vec{r}, t)$ – напряженность электрического поля (В/м); $\vec{H}(\vec{r}, t)$ – напряженность магнитного поля (А/м); $\vec{D}(\vec{r}, t)$ – индукция электрического поля (К/м²); $\vec{B}(\vec{r}, t)$ – индукция магнитного поля (В/м²); $\vec{J}_{\text{стор}}$ – плотность стороннего тока (А/м²).

Решение системы уравнений (7) – (10) следует проводить при соответствующих граничных и начальных условиях. В полной постановке данная задача не имеет аналитического решения и требует применения сеточного конечно-разностного метода (например, метода конечных разностей [30, 31]). Результатом такого решения является определение распределения интенсивности суммарного ЭМП (без разделения на возможные виды колебания) в виде количественного значения напряженностей $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и $\vec{H}(\vec{r}, t)$.

Среди более простых подходов к моделированию ЭМП в свободном пространстве, произвольной среде или в электродинамической структуре (резонаторе) является решение волновых уравнений для электрической и магнитной компонент поля

$$\Delta \vec{E} + k_0^2 \vec{E} = 0, \quad (11)$$

$$\Delta \vec{H} + k_0^2 \vec{H} = 0, \quad (12)$$

где $k_0 = \frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon(\vec{r}, t) \cdot \mu(\vec{r}, t)}$ – постоянная распространения в биологической среде; $\omega = 2\pi f$ – круговая частота.

Характер решения уравнений (11) и (12) зависит от параметров электродинамической системы и сложности ее граничных условий, а также электрофизических параметров самой среды распространения (биологической системы).

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Разработка математических моделей биологических систем представляет собой сложную биофизическую задачу, для решения которой следует обобщить богатый практический опыт, новые научные идеи и знания в области информатики, биологии, биофизики и медицины, а затем представить их в виде, удобном для математического описания.

Для выбора параметров, характеризующих электрические свойства тканей живых организмов (кожный покров, жировая ткань, мышцы, кровь, печень, кости и т.п.), воспользуемся результатами исследований поведения относительной диэлектрической проницаемости ε и удельной электропроводности σ для разных частот [32–34].

Количественные значения данных параметров для разных частот ЭМП представлены в таблице.

Рассмотрим особенности построения математических моделей биологических систем для разных случаев воздействия ЭМИ.

Случай теплового воздействия ЭМП.

Рассмотрение теплового действия ЭМИ проводится на макроуровне. Эффективность преобразования электромагнитной энергии в тепло-

вую и нагрев биологических тканей зависит от электрофизических и физиологических параметров ткани, а также от внутренних особенностей ее строения с учетом патологических изменений, вызванных заболеванием. Для определения внутренней структуры ткани с очагом заболевания следует воспользоваться возможностями томографического исследования для построения 2-D и/или 3-D изображений области ее поражения. В результате определяются границы патологического поражения, что позволяет корректно задать граничные условия для решения электродинамической задачи нахождения распределения напряженностей $\vec{E}(\vec{r}, t)$ и $\vec{H}(\vec{r}, t)$ ЭМП и решения уравнения теплопроводности для определения температуры нагрева ткани.

Решение электродинамической задачи зависит от сложности граничных условий исследуемой области ткани и проводится с использованием одной из математических моделей ЭМП, т.е. численное или аналитическое решение уравнений (6) – (9) или (10) и (11) позволяет получить распределение электрического поля $\vec{E}(\vec{r})$ в исследуемой области для разных моментов времени.

Для получения уравнения теплопроводности воспользуемся законом сохранения количества тепла, выделяемого в исследуемой области поражения. Наличие изображения ткани дает возможность установить взаимосвязь между количеством поглощенной электромагнитной энергии и механизмами охлаждения ткани за счет теплопроводности различных ее областей, кровообращения и т.п. Для определения зависимости между энергией и скоростью изменения во времени температуры на единицу объема облучаемой ткани рассмотрим выражение

$$\frac{d(\Delta T)}{dt} = \frac{1}{c} \cdot (P_{\text{то}} + P_{\text{погл}} - P_{\text{т}} - P_{\text{к}}), \quad (13)$$

где $P_{\text{то}}$ – мощность метаболического теплообразования (Вт/кг); $P_{\text{погл}}$ – мощность, поглощенная

Таблица

Некоторые электрические свойства тканей человека и животных на различных частотах

Частота поля f	Кожа		Жировая ткань		Мышцы		Кровь		Кость		Головной мозг		Костный мозг
	ε	$\sigma \cdot 10^{-3}$	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε	σ	ε
10 Гц					$1 \cdot 10^7$	1,04							
100 Гц			$15 \cdot 10^4$		$8 \cdot 10^5$	1,12		6,03					
1 кГц			$5 \cdot 10^4$	0,47	$1,3 \cdot 10^5$	1,25		6,03			1,43		
10 кГц			$2 \cdot 10^4$		$5,5 \cdot 10^4$	1,32	$2,9 \cdot 10^3$	6,81					
100 кГц					$1 \cdot 10^4$	4,76	$2,7 \cdot 10^3$	6,81			1,49		
1 МГц					$2 \cdot 10^3$	5,41	$2,0 \cdot 10^3$	7,15			1,79		
10 МГц						6,26	$2,0 \cdot 10^2$	11,1			2,67		
100 МГц			12,0	0,83	73,5	8,7	74,5	12,2			5,13	82	7,5
1 ГГц	45,0	10,5	4,6	0,91	54,0	12,1	63,0	12,5	8,0	0,5			6,0
10 ГГц	35,5	87,0	3,6	4,77	29,0	76,9	45,0	115,2	6,6	7,7			5,8
24 ГГц	23,0		3,4	14,1			32,0	263,2	6,3	14,1			

в тканях (Вт/кг); P_T – мощность, рассеиваемая за счет теплопроводности (Вт/кг); P_K – мощность, отводимая системой кровообращения (Вт/кг); A_0 – удельная теплоемкость ткани (Дж/кг град); $\Delta T = (T - T_0)$ – разность между текущей температурой ткани T и исходной ее температурой до начала нагревания T_0 (комнатная температура).

Для определения мощности метаболического теплообразования воспользуемся выражением [4]:

$$P_{то} = P_0 \cdot (1,1)^{\Delta T}, \quad (14)$$

где P_0 – начальная мощность метаболического теплообразования (Вт/кг).

Мощность, поглощаемая тканью при воздействии внешнего ЭМП, равна

$$P_{полл} = \frac{\sigma}{\rho} \cdot |E(\vec{r})|^2, \quad (15)$$

где σ – удельная проводимость ткани в заданном объеме (См/м); ρ – плотность ткани (кг/м³); $E(\vec{r})$ – среднеквадратичное значение напряженности электрического поля в объеме ткани (В/м).

Отводится тепло от тканей за счет явления теплопроводности и наличия кровообращения в исследуемой области. Мощность, отводимая за счет теплопроводности ткани, равна

$$P_T = \frac{\lambda_T}{\rho} \cdot \Delta T, \quad (16)$$

где λ_T – удельная теплопроводность ткани (Вт/(м град)).

Полагая, что кровь поступает в исследуемую область с температурой $T_{к0}$, а покидает область с температурой T_k , то для мощности, отводимой за счет кровообращения, можно воспользоваться выражением, полученным в [4]:

$$P_K = \frac{k \cdot v_k \cdot c_k}{\rho_k} \cdot \Delta T_k, \quad (17)$$

где $\Delta T_k = T_k - T_{к0}$; c_k – удельная теплоемкость крови; ρ_k – объемная плотность крови, кг/м³; v_k – скорость тока крови; $k = 0,698$ – постоянная величина.

Таким образом, для известных формы и тканевого состава исследуемой области организма с учетом физических и тепловых характеристик тканей проводится самосогласованное решение прямой электродинамической задачи и задачи теплопроводности. Результатом решения данной задачи является определение температурного поля $T(\vec{r})$ в тканях исследуемой области.

Случай информационного (нетеплового или специфического) воздействия ЭМП. Снижение интенсивности ЭМИ до уровня, когда плотность мощности не превышает 10 мВт/см², вызывает уменьшение тепловой нагрузки на биологические ткани. В результате температура в облучаемых тканях практически не изменяется (нагревание облучаемых объектов соответствует долям градуса) [1]. С другой стороны, при воздействии

ЭМП такой интенсивности КВЧ диапазона в организме наблюдаются проявления «биологических эффектов», которые рассматриваются как специфическое воздействие (по определению акад. Девяткова Н.Д. [6]) с явно выраженным пороговым эффектом при плотности мощности $P_{пор} = 10^{-4}$ Вт/см². Идея применения ЭМИ КВЧ диапазона в своей основе сводится к его использованию в целях передачи информации (или управляющих сигналов) между клетками внутри живых организмов [1, 3, 5–7, 14]. В этом случае клетки живого организма рассматриваются не только как объекты воздействия ЭМП, но и как активные элементы организма, формирующие отклик организма человека (тепловое излучение) на действие внешнего ЭМП КВЧ диапазона. Полагая, что плотность мощности излучения живого организма в КВЧ диапазоне равна $P_T = 10^{-18} - 10^{-19}$ Вт/см², т.е. $P_{пор} \gg P_T$ подтверждает эффективность воздействия внешнего ЭМИ на биологические объекты [35]. Указанный факт дополняется ярко выраженной частотной зависимостью биологического отклика и проявлением резонансного эффекта. По совокупности экспериментально обнаруженных закономерностей взаимодействия низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона с биологической системой можно рассматривать как нетепловое воздействие. В этом случае основное внимание следует уделять модуляционно-временным параметрам и форме сигналов, воздействующим на биологические объекты живого организма, т.е. полагая, что воздействующее ЭМП представляется в виде обобщенной функции

$$U(t) = \bar{U} \cdot [1 + \alpha(t)] \cdot \cos[\bar{\omega}t + \varphi(t)], \quad (18)$$

где \bar{U} и $\bar{\omega}$ – средние постоянные значения амплитуды и частоты ЭМП; $\alpha(t)$ и $\varphi(t)$ – функции, определяющие законы изменения частоты и фазы поля и являющиеся медленно меняющимися по сравнению с $\cos(\bar{\omega}t)$ [36]. Как видно, наиболее перспективными сигналами для применения в качестве воздействующего неионизирующего ЭМИ низкой интенсивности являются частотно-модулированные колебания с программируемым законом модуляции. Применение таких сигналов требует использования высокостабильных по частоте электромагнитных колебаний и применения соответствующих источников таких колебаний. Существенным недостатком современных экспериментальных методов исследования воздействия ЭМИ КВЧ диапазона является не учет рассмотрения и влияния нестабильности частоты излучения генераторов СВЧ на биофизические процессы и по сути сводится к применению сигналов со случайным поведением частоты (фазы). Несмотря на накопленный колоссальный экспериментальный опыт по воздействию низкоинтенсивного ЭМИ различных частот и амплитуд, сейчас невозможно дать однозначный ответ о законах модуляции основного колебания

с точки зрения получения прогнозируемого поведения биологического объекта. В этом плане роль математических методов и моделирования для создания общей теории прогнозирования эффектов воздействия и отклика биологического объекта (клетки) становится определяющей. Рассматривая клетку как самостоятельный биологический объект, как показано в [35], следует исследовать амплитудно-частотные характеристики ЭМП, генерируемого здоровыми клетками организма. Это позволит сравнить ЭМП разных клеток (как здоровых, так и больных) и при необходимости проводить коррекцию ЭМИ больных клеток с помощью внешнего КВЧ излучения, подбирая нужный закон модуляции его амплитуды и частоты (фазы). В таком случае проводится синхронизация работы сложной колебательной системы, в качестве которой рассматривается живой организм как совокупность огромного числа клеток. Для математического представления таких сложных систем целесообразно использовать систему связанных обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой формализован и определен характер связей между отдельными составляющими их биологическими объектами (клетками).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМИ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Существуют различные подходы к математическому моделированию воздействия ЭМИ на биологические системы и объекты [19–24]. Одним из таких подходов может служить стимуляция иммунной системы организма внешним низкоинтенсивным ЭМИ КВЧ диапазона. В качестве математической модели такого процесса можно рассматривать дальнейшее развитие математической модели противобактериального иммунного ответа в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений (1) – (4) и начальных условий (5) с учетом влияния дополнительных факторов в виде ЭМИ [23].

На рис. 8 показано схематическое изображение иммунной системы человека с учетом действия внешнего фактора в виде ЭМИ с фиксированной амплитудой и частотой.

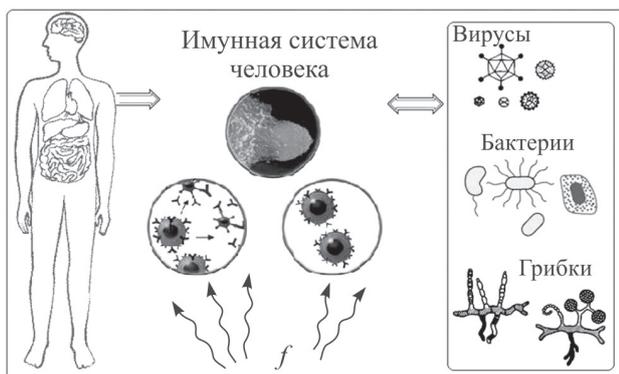


Рис. 8. Схематическое изображение иммунной системы человека

Простейшую математическую модель инфекционного заболевания, описывающую изменение в организме человека с учетом действия разнообразных внешних факторов, включая воздействие патогенных микроорганизмов и низкоинтенсивного ЭМИ КВЧ диапазона с заданными значениями амплитуды E_m и частоты ω можно представить в виде:

$$\frac{dV}{dt} = (\beta - \gamma F)V + \alpha_V(E_m, \omega) \cdot V ; \quad (19)$$

$$\frac{dC}{dt} = \xi(m)\alpha V(t - \tau)F(t - \tau) - \mu_C(C - C^*) + \alpha_C(E_m, \omega) \cdot C ; \quad (20)$$

$$\frac{dF}{dt} = \rho_F C - (\mu_f + \eta \gamma V)F + \alpha_F(E_m, \omega)F ; \quad (21)$$

$$\frac{dm}{dt} = \sigma V - \mu_m m + \alpha_m(E_m, \omega) \cdot m . \quad (22)$$

В качестве начальных условий решения данной системы обыкновенных дифференциальных уравнений используем выражения (5). Коэффициенты α_V , α_C , α_F и α_m в правой части системы (19) – (22) являются функциями амплитуды E_m и частоты ω . Физический смысл данных коэффициентов и аналитическое представление их функциональных зависимостей для количественного определения значений требуют отдельного, более подробного и глубокого изучения. Система уравнений формируется отдельно для каждого заболевания с учетом характера проникновения антигенов в организм человека и действия ЭМИ.

Рассмотренная математическая модель может быть использована как для моделирования и поиска путей разрушения специфических антигенов, так и для стимуляции иммунной системы человека.

Для концептуального изучения влияния ЭМИ СВЧ и КВЧ диапазонов различной интенсивности на кровь и ее форменные объекты (1 – эритроциты, 2 – лейкоциты, 3 – тромбоциты) рассмотрим общий алгоритм построения детерминированной математической модели такого процесса на микро- и макроуровнях. Рассмотрим феноменологическую модель системы кровообращения человека, которая схематично представлена на рис. 9.

Как видно, кровь в процессе циркуляции в теле человека взаимодействует с другими органами (взаимодействие на макроуровне, рис. 9, а). С другой стороны, объекты крови обладают электрическим зарядом, реализуя электромагнитный механизм взаимодействия (взаимодействие на микроуровне, рис. 9, б). В зависимости от поставленной цели такое взаимодействие может быть определяющим, а может являться второстепенным. Степень связи определяется коэффициентами связи на макро- D_{ij} и микро- C_{ij} уровнях, где $i = 1, 2, 3, \dots, M_{об}$ – текущий индекс, характе-

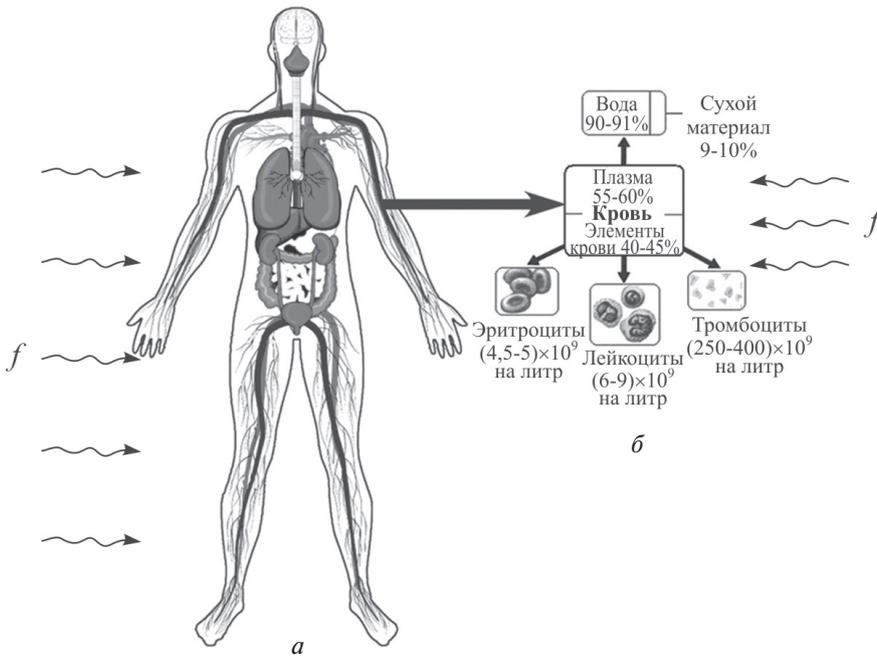


Рис. 9. Схематическое изображение кровеносной системы человека на макро- (а) и микро- (б) уровнях

ризирующий номер форменного объекта крови, включая патогенные микроорганизмы (вирусы, бактерии, грибки); $j = 1, 2, 3, \dots, M_{op}$ — текущий индекс, характеризующий номер органа, с которым взаимодействует кровь.

В результате воздействия ЭМИ на кровь и ее объекты ($N_1, N_2, N_3, \dots, N_{M_{об}}$), а также последующее взаимодействие объектов крови с другими органами приводит к изменению как общего количества объектов крови, так и их размеров и формы. Для определения динамики изменения числа объектов крови для каждого объекта рассматривается система связанных обыкновенных дифференциальных уравнений, для которой решается задача Коши. В начальный момент времени при $t = t_0$ задается исходное (начальное) количество объектов крови и рассматривается их эволюция с учетом фактора внешнего воздействия. Окончательно, система связанных обыкновенных дифференциальных уравнений для форменных элементов и возможных патогенных микроорганизмов крови имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dN_1}{dt} &= \sum_{j=1}^{M_{op}} (C_{1j} \cdot N_j) + C_{1x} \cdot N_x + \sum_{j=1}^{M_{op}} (D_{1j} \cdot N_1); \\ \frac{dN_2}{dt} &= \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^{M_{op}} (C_{2j} \cdot N_j) + C_{2x} \cdot N_x + \sum_{j=1}^{M_{op}} (D_{2j} \cdot N_2); \\ &\vdots \\ \frac{dN_{M_{об}}}{dt} &= \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^{M_{op}} (C_{M_{об}j} \cdot N_j) + C_{M_{об}x} \cdot N_x + \sum_{j=1}^{M_{op}} (D_{M_{об}j} \cdot N_{M_{об}}); \\ \frac{dN_x}{dt} &= \sum_{\substack{j=1 \\ (j \neq i)}}^{M_{op}} (C_{xj} \cdot N_j) + C_{xx} \cdot N_x + \sum_{j=1}^{M_{op}} (D_{xj} \cdot N_x). \end{aligned} \right. \quad (23)$$

В системе уравнений (23) вводится дополнительное уравнение для x — объекта крови. Под данным объектом понимается внешний объект крови (вирус, микроб, бактерия), наличие которого требует проведения терапевтических действий.

В качестве коэффициентов связи D_{ij} и C_{ij} рассматриваются сложные функции многих переменных, включая и параметры ЭМИ (амплитуду и частоту ЭМП). Определение коэффициентов связи в виде аналитической зависимости представляет собой сложную задачу, требующую отдельного рассмотрения.

Решением системы уравнений (23) являются временные зависимости числа объектов крови. Динамика их изменения позволяет прогнозировать достижение положительного терапевтического эффекта.

Для исследования изменений размеров и формы объектов крови как следствие внешнего электромагнитного воздействия следует использовать дополнительно математические модели самих объектов крови (например, модель эритроцита [43] и т.д.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлен подробный анализ воздействия ЭМИ широкого диапазона частот и интенсивностей на биологические системы и объекты. Проведенный анализ фундаментальных литературных источников показал проблемы, которые сопутствуют экспериментальным методам исследования влияния ЭМИ на биологические объекты. Показана и обоснована необходимость в математическом моделировании процессов воздействия ЭМИ различной интенсивности на биологические системы и объекты с учетом их представления на макро- и микроуровнях. Показаны алгоритмы построения математических моделей различных заболеваний с учетом внешнего электромагнитного воздействия. Получила дальнейшее развитие математическая модель инфекционного заболевания, учитывающая воздействие на организм человека различных внешних факторов и особенности реакции иммунной системы.

Рассмотрены современные математические модели крови. На основе проделанных исследований была предложена концепция построения математической модели крови, отражающей эволюционный цикл изменений, происходящий в организме человека при воздействии внешних факторов различной природы (естественных,

электромагнитных, клинических). Предложена базовая феноменологическая модель кровеносной системы и получена математическая ее модель, описывающая поведение крови как активной системы на микро- и макроуровнях при условии внешнего электромагнитного воздействия. Применение данной математической модели позволит количественно определить эволюцию объектов крови в процессе воздействия ЭМИ и спрогнозировать последствия такого воздействия.

Литература

- [1] *Пресман А.С.* Электромагнитные поля и живая природа. — М.: Наука, 1968. — 227 с.
- [2] *Шван Х.П.* Воздействие высокочастотных полей на биологические системы: Электрические свойства и биофизические механизмы // ТИИЭР, т. 68, № 1, 1980. — С. 121–132.
- [3] *Девятков Н.Д., Голант М.Б., Бецкий О.В.* Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М.: Изд-во «Радио и связь», 1988. — 63 с.
- [4] *Гай, Леманн, Стоунбридж.* Применение электромагнитной энергии в терапии // ТИИЭР, т. 62, № 1, 1974. — С. 66 – 93.
- [5] *Макри Д.И.* Исследование нетепловых резонансных эффектов мм-излучения как начало новой биофизике // ТИИЭР, т. 68, № 1, 1980. — С. 40 – 48.
- [6] Нетепловые эффекты миллиметрового излучения / Под ред. Н.Д. Девяткова. — М.: ИРЭ АН СССР, 1981. — 338 с.
- [7] *Бецкий О.В., Голант М.Б., Девятков Н.Д.* Миллиметровые волны в биологии. — М.: Изд-во «Знание», 1988. — 63 с.
- [8] Кватново-биологическая теория. / Под ред. В.В. Бойко и М.О. Красноголовца. — Х.: «Факт», 2003. — 968 с.
- [9] Радиофизические основы и опыт применения СВЧ электромагнитных полей в хирургии. / Под ред. проф. В.В. Бойко. — Х.: Новое слово, 2009. — 166 с.
- [10] *Москаленко В.Ф., Сітько С.П., Горбань Є.М., Грубник Б.П., Яненко О.П.* Квантова медицина: від фундаментальних основ до практичного використання. Український медичний часопис. — № 2 (28), 2002/ С. 106–109.
- [11] *Эйди У.Р.* Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань // ТИИЭР. Т. 68, № 1, 1980. — С. 128–147.
- [12] *Riadh W.Y. Habash, Rajeev Bansal, Daniel Krewski, Hafid T. Alhafid* Thermal Therapy, Part 1: An introduction to Thermal Therapy, Critical Reviews in Biomedical Engineering, 34 (6). — 2006. P. 459–489.
- [13] *С.П. Осинский.* Гипертермия в клинической онкологии: современное состояние проблемы (по итогам 20-й ежегодной конференции Европейского общества гипертермической онкологии (ESHO)). Онкология, т.4, № 4, 2002. — С. 288–292.
- [14] *Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедев Н.Н.* Миллиметровые волны и живые системы. — М.: «Сайнс-пресс», 2004. — 107 с.
- [15] *О.И. Белоус, Б.Г. Емец, В.А. Малахов и др.* Роль КВЧ излучения в повышении биологической активности крови, Радиофизика и электроника, т.13, №4, 2008. — С. 556–561.
- [16] *А.Л. Чижевский.* Электрические и магнитные свойства эритроцитов, Киев: «Наукова думка», 1973. — 94 с.
- [17] *C. NĂDEJDE, D.E. CREANGĂ, C. GOICEANU* Radiofrequency electromagnetic wave and paramagnetic particle effects on the red blood cells Rom. Journ. Phys. vol. 54, nos. 1-2, P. 105-114, Bucharest, 2009
- [18] *Г.Р. Иваницкий.* Математическая биофизика клетки / В.И. Кринский, Е.Е. Сельков. — М.: Наука, 1978. — 310 с.
- [19] *Ризниченко Г.Ю.* Математические модели в биофизике и экологии. — Москва-Ижевск: Институт компьютерных исследований. — 2003. —184 с.
- [20] *J.D. Murray,* Mathematical Biology I. An Introduction. — 3rd ed. Springer — 2001. — 551 p.
- [21] *Погожев И.Б.* Применение математических моделей заболеваний в клинической практике. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 192 с.
- [22] *Зуев С.М.* Математические модели и методы анализа медико-биологических данных. Академия наук СССР, Отдел вычислительной математики, 1990. — 113 с.
- [23] *Марчук Г.И.* Математические модели в иммунологии. Вычислительные методы и эксперименты. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Наука. Гл.ред. физ.-мат. лит., 1991. — 304 с.
- [24] *Galstyan S.G., Perova I.G., Churyumov G.I.* Mathematical model of the influence of electromagnetic radiation on biological nano-objects / VI Международная научная конференция «Функциональная база нанoeлектроники». Сборник научных трудов. — Харьков: ХНУРЭ. 2013. — С. 121–124.
- [25] *Чуян Е.Н., Трибрат Н.С.* Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты на процессы микроциркуляции. Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». Т. 21 (60). 2008. № 1. С. 156 – 166.
- [26] *Jackson J.D.* Classical Electrodynamics. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc. 2001. — 807 с.
- [27] *Березовский В.А., Колотилов Н.Н.* Биофизические характеристики тканей человека. — Киев: Наукова думка. 1990. — 224 с.
- [28] *Tzirtzilakis E.E.* A mathematical model for blood flow in magnetical field. Physics of fluids 17, 2005. 077103-1-15.
- [29] *Махонина М.М., Чуян Е.Н., Бержанский В.Н., Попов В.В.* Изменение содержания серотонина в лейкоцитах крови крыс при действии низкоинтенсивного электромагнитного излучения крайне высокой частоты. Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Серия «Биология, химия». Т. 19 (58). 2006. № 4. С. 151 – 160.
- [30] *Taflove A., Hagness S.C.* Computational Electrodynamics. The Finite Difference Time Domain Method. — 3rd Edition. — 2005. — 997 p.
- [31] *Kunz K.S., Luebbers R.J.* The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics. CRC Press. 1993. — 446 p.
- [32] *Schwan H.F.* Electrical Properties of Tissues // Adv. Biol. And Med. Phys. — 1957. - # 5. — P. 147.
- [33] *Schwan H.F., Li K.* Capacity and Conductivity of Body Tissues of UHF // Proc. IRE. — 1953. — 41. — # 12. — P. 1735–1740.

- [34] Шван Н. Электрические свойства тканей. — В кн. СВЧ-энергетика. — М.: Мир. — 1971. — 227 с.
- [35] Бецкий О.В., Котровская Т.И., Лебедева Н.Н. Миллиметровые волны в биологии и медицине. III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» — ИРЭ РАН. 2009.
- [36] Малахов А.Н. Флуктуации в автоколебательных системах. — М.: Наука. 1968. — 660 с.
- [37] Lehmann J. F. Ultrasound Therapy // in Therapeutic Heat and Cold, S. Licht, Ed. New Haven, Conn.: Licht, 1965, sec. 13. P. 321–386.
- [38] // <http://www.health.org>. История развития ультразвуковой диагностики.
- [39] Буц В.А., Скибенко К.Н. Один из механизмов биологического действия ультразвука. Зарубежная радиоэлектроника, 1996, № 12. — С. 52–56.
- [40] Licht S., History of Therapeutic heat / in Therapeutic Heat and Cold, S. Licht, Ed. New Haven, Conn.: Licht, 1965, sec. 6, P. 196–231.
- [41] Krusen F.H. and other. Microwave therapy: Preliminary report of experimental studies of the heating effect of microwave (radar) in living tissues. Proc. Staff Meet. Maya Clin., v. 22, 1947. P. 209–224.
- [42] Schwan H.P., Piersal G.M. The Absorption of Electromagnetic Energy in Body Tissues. Pt. 1. Amer. J. Phys. Med., vol. 2, 1954. P. 371–404.
- [43] Pivkin I.V., Karniadakis G.E. Accurate Coarse-Grained Modeling of Red Blood Cells. Physical Review Letters. PRL101. E008.

Поступила в редколлегию 28.01.2014

Галстян Соня Гургеновна, аспирантка кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: математическое моделирование инфекционных заболеваний, применение микроволновых технологий в медицине и биологии.



Перова Ирина Геннадьевна, кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры биомедицинской электроники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: обработка медицинских данных, применение методов вычислительного интеллекта для анализа медицинских данных.



Чурюмов Геннадий Иванович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физических основ электронной техники Харьковского национального университета радиоэлектроники. Научные интересы: математическое моделирование нелинейных процессов; теория и техника СВЧ, применение микроволновых технологий.



УДК 532.616

Медицинні аспекти впливу електромагнітного випромінювання на біологічні системи і об'єкти: від математичного моделювання до експерименту / С. Г. Галстян, І. Г. Перова, Г. І. Чурюмов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. — 2014. — Т. 13. — № 1. — С. 71–82.

У даній роботі проведено аналіз експериментальних і теоретичних досліджень впливу електромагнітного випромінювання на біологічні системи та об'єкти живої природи. Розглядаються особливості і специфіка теплого (потужність випромінювання понад 10 Вт) і нетеплого (інформаційного) (потужність випромінювання менше 1 Вт) застосування електромагнітної енергії в лікувальних цілях. Наводяться варіанти побудови математичних моделей електромагнітного поля і біологічних систем на основі самоузгоджених систем диференціальних рівнянь у частинних похідних для електромагнітного поля (рівняння Максвелла, хвильове рівняння) і рівняння теплопровідності. Набула подальшого розвитку математична модель протибактеріальної імунної відповіді з урахуванням дії зовнішнього електромагнітного поля. Розглянуто застосування пов'язаних диференціальних рівнянь першого порядку для моделювання процесу впливу електромагнітного поля на фазові біологічні об'єкти крові.

Ключові слова: електромагнітне поле, біологічна система, математична модель, тепловий вплив, інформаційний вплив, мікрохвильова діагностика.

Табл.: 1. Іл.: 9. Бібліогр.: 42 найм.

UDC 532.616

Medical aspects of electromagnetic field impact on biological systems and objects: from mathematical modelling to experiment / S. G. Galstyan, I. G. Perova, G. I. Churyumov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. — 2014. — Vol. 13. — № 1. — P. 71–82.

The paper analyzes experimental and theoretical studies of the impact of electromagnetic radiation on biological systems and living nature objects. Peculiarities and specificity of thermal (over 10 W radiation power) and nonthermal (information) (less than 10 W radiation power) applications of electromagnetic energy in therapeutic goals are considered. Variants of constructing mathematical models of electromagnetic field and biological systems on the basis of self-consistent systems of differential equations in partial derivatives for electromagnetic field (Maxwell equations, wave equation) and thermal conduction equation are given. The paper extends the mathematical model of antibacterial immune response with due account of the action of the external electromagnetic field.

Keywords: electromagnetic field, biological system, mathematical model, thermal effect, information influence, microwave diagnostics.

Tab.: 1. Fig.: 9. Ref.: 42 items.