

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

---

**В.М. Перельмутер, В.А. Ча, Е.М. Чуприкова**

**МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
ВОЛН С ОРГАНИЗМОМ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия  
Редакционно-издательским советом  
Томского политехнического университета*

Издательство  
Томского политехнического университета  
2009

УДК 614.876(075.8)  
ББК 28.071я73  
П27

**Перельмутер В.М.**

П27      Медико-биологические аспекты взаимодействия электромагнитных волн с организмом: учебное пособие / В.М. Перельмутер, В.А. Ча, Е.М. Чуприкова. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 128 с.

Учебное пособие создано на основе курса лекций, подготовленных авторами по магистерской программе «Медицинская физика». Одна из основных целей пособия – изучение основных этапов развития теоретических и экспериментальных исследований воздействия электромагнитных волн миллиметрового диапазона низкой интенсивности на биологические системы различной сложности организации, включая живые организмы.

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Атомная энергетика, ядерный топливный цикл, безопасное обращение с радиоактивными отходами и отработанным ядерным топливом, обеспечение безопасности и противодействие терроризму» и предназначено для студентов старших курсов, магистрантов и аспирантов, обучающихся по физическим и медико-биологическим специальностям.

**УДК 614.876(075.8)**  
**ББК 28.071я73**

*Рецензенты*

Доктор медицинских наук, профессор СибГМУ

*И.В. Суходоло*

Кандидат технических наук, академик РАЕН  
директор ООО «Спинор»

*А.М. Кожемякин*

- © ГОУ ВПО «Томский политехнический университет», 2009
- © Перельмутер В.М., Ча В.А., Чуприкова Е.М., 2009
- © Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2009

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|   |    |
|---|----|
| Введение .....  | 5  |
| 0.1. Актуальность изучения биологических эффектов<br>электромагнитного излучения .....                                    | 5  |
| 0.2. Характеристики электромагнитного излучения сверхвысоких<br>и крайне высоких частот .....                             | 9  |
| 0.3. Частотные характеристики электромагнитного излучения<br>биологической значимости .....                               | 12 |
| Список литературы к главе .....   | 13 |
| 1. Влияние электромагнитного излучения на биологические<br>объекты различного уровня организации .....                    | 15 |
| 1.1. Белки как возможные рецепторы электромагнитного<br>излучения .....   | 15 |
| 1.2. Действие электромагнитного излучения<br>на конформационные состояния в белках .....                                  | 19 |
| 1.3. Вероятность изменения состояния мембраны клеток .....  | 22 |
| 1.4. Изменения в прохождении нервного импульса .....  | 25 |
| 1.5. Влияние электромагнитного излучения на биологические<br>свойства микроорганизмов .....                               | 27 |
| 1.6. Влияние электромагнитного излучения<br>на метаболические процессы на клеточном уровне .....                          | 30 |
| 1.7. Модификация митотического цикла .....  | 31 |
| 1.8. Модификация адгезивных свойств клеток .....  | 33 |
| 1.9. Особенности межклеточной кооперации .....  | 34 |
| 1.10. Электромагнитное излучение как индуктор апоптоза .....  | 36 |
| 1.11. Эффекты электромагнитного излучения<br>на клетки злокачественных опухолей .....                                     | 37 |
| 1.12. Заключение .....  | 38 |
| Список литературы к главе .....   | 39 |
| 2. Влияние электромагнитного излучения на организм в целом .....  | 45 |
| 2.1. Функциональная и морфологическая модификация биологических<br>тканей под действием электромагнитного излучения ..... | 46 |
| 2.2. Особенности изменений нервной и эндокринной<br>систем организма под действием электромагнитных волн .....            | 48 |
| 2.3. Характеристики стрессорного и адаптогенного эффектов<br>электромагнитных волн .....                                  | 52 |
| 2.4. Влияние электромагнитного излучения на поведение животных ...  | 55 |
| 2.5. Изменения в поведении человека под действием<br>электромагнитного излучения .....                                    | 58 |
| 2.6. Целенаправленная коррекция состояния физиологических<br>систем организма .....                                       | 59 |

|  |     |
|--|-----|
| 2.7. Зависимость локальных и общего эффектов от частоты электромагнитных волн, удельной поглощенной мощности от времени воздействия и типа излучения (непрерывный или импульсный режим) . . . . .                          | 63  |
| 2.8. Заключение . . . . .  | 66  |
| Список литературы к главе . . . . .  | 69  |
| 3. Патогенные эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона . . . . .  | 72  |
| 3.1. Изменения генома: мутагенный эффект, уродства развития (тератогенное влияние) . . . . .   | 72  |
| 3.2. Воздействие на половую (репродуктивную) систему . . . . .   | 75  |
| 3.3. Нарушения нейроэндокринной регуляции . . . . .  | 76  |
| 3.4. Обратимость изменений систем, чувствительных к воздействию ЭМИ СВЧ-диапазона . . . . .  | 78  |
| Список литературы к главе . . . . .  | 79  |
| 4. Терапевтические эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона . . . . .   | 81  |
| 4.1. Терапевтические эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона теплового уровня мощности . . . . .   | 82  |
| 4.2. Терапевтические эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона нетеплового уровня мощности . . . . .   | 82  |
| 4.3. Стимуляция кроветворения . . . . .  | 83  |
| 4.4. Стимуляция иммунной системы . . . . .   | 84  |
| 4.5. Влияние на заживление язв желудочно-кишечного тракта . . . . .  | 84  |
| 4.6. Стимуляция регенерации костной ткани . . . . .  | 86  |
| 4.7. Зависимость лечебных эффектов от удельной поглощенной мощности, частоты, времени действия излучения, непрерывного и импульсного режимов с учетом длительности импульсов, частоты повторения, параметров фор . . . . . | 87  |
| 4.8. Заключение . . . . .  | 87  |
| Список литературы к главе . . . . .  | 89  |
| 5. Зависимость влияния ЭМИ СВЧ-диапазона на организм от функционального состояния его физиологических систем . . . . .   | 91  |
| 5.1. Роль исходного уровня активности физиологических систем . . . . .   | 92  |
| 5.2. Значение функциональной асимметрии систем, представленных парными органами . . . . .  | 93  |
| 5.3. Прогнозирование биологических эффектов ЭМИ СВЧ-диапазона . . . . .  | 96  |
| Список литературы к главе . . . . .  | 97  |
| 6. Механизмы, лежащие в основе воздействия электромагнитного излучения СВЧ-диапазона . . . . .   | 99  |
| 6.1. Физические механизмы воздействия излучения теплового уровня . . . . .   | 99  |
| 6.2. Вероятные физические механизмы воздействия излучения нетеплового уровня . . . . .   | 102 |
| 6.3. Физиологические механизмы рецепции ЭМИ на уровне целого организма . . . . .   | 108 |
| 6.4. Сенсорные системы млекопитающих. Роль структурной организации кожи в рецепции ЭМИ . . . . .   | 112 |
| 6.5. Заключение . . . . .  | 119 |
| Список литературы к главе . . . . .  | 121 |
| Заключение . . . . .   | 125 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

### **0.1. Актуальность изучения биологических эффектов электромагнитного излучения**

Технический прогресс во многих его проявлениях связан с использованием электромагнитных полей или их генерацией как побочного продукта. Суммарная мощность источников электромагнитных полей постоянно возрастает, а параметры электромагнитного излучения становятся более разнообразными, так что люди и в целом экосистема подвергаются воздействию электромагнитных сигналов с возрастающей интенсивностью и непривычными, не встречавшимися ранее характеристиками. Это воздействие вполне можно назвать электромагнитным загрязнением среды. Средняя интенсивность этого электромагнитного фона крайне низка, но в ряде местностей и в некоторые периоды времени она значительна, особенно для персонала, обслуживающего различные системы связи, локации, технологические установки. Неизбежность подвергнуться воздействию электромагнитного излучения с возможно неблагоприятными последствиями заставляет нас оценить опасность различных типов этого физического фактора для здоровья человека. В ряде работ найдена связь между временем воздействия электромагнитных волн и возникновением различных заболеваний. Например, в обзоре Л. Вершаевой [1] указывается на увеличение частотности лейкоза и возникновения злокачественных опухолей центральной нервной системы у детей, подвергшихся воздействию электромагнитного излучения. Также подчеркивается возможность образования свободных радикалов под воздействием электромагнитных полей, что ведет к нарушениям генома вплоть до разрыва ДНК цепей.

В работе Дж. И. Троско [2] говорится о трех механизмах возможного влияния электромагнитных волн на статус генетической системы организма и, в конечном счете, на состояние здоровья человека: 1) киллинг клеток (цитотоксикоз); 2) генетические или хромосомные мутации; 3) изменение экспрессии генетической информации при тран-

скрипции (блокировка или деблокировка различных локусов генома при считывании) на трансляционном (стабилизация или дестабилизация генетических сообщений) и пост-трансляционном (изменение генного продукта – белка) уровнях. Эти эффекты потенциально могут приводить к различным заболеваниям. Последний механизм, в отличие от двух предыдущих, является необратимым и характеризуется пороговым поведением, разнообразными биохимическими путями развития, и требует многократного воздействия электромагнитного излучения для проявления эффекта. В конечном счете, электромагнитные волны как эпигенетический фактор вызывают в клетке один из четырех следующих эффектов: изменение роста и процесса пролиферации; нарушения в дифференциации клеток; программируемая смерть клеток (апоптоз); адаптивные отклики дифференцированных клеток.

В обзорах Дж.Р. Голдсмита и Ю. Ютилайнена [3, 4] обсуждается опасность для человека различных устройств, включая и бытовые. Указываются четыре фактора, проявляющих влияние этих приборов на состояние здоровья: 1) нарушения гематологических показателей; 2) изменения в хромосомах лейкоцитов; 3) возрастание частоты неблагоприятных родов; 4) более широкое распространение раковых заболеваний. Ряд эпидемиологических работ посвящен исследованию корреляции между электромагнитным облучением и определенными заболеваниями. С. Змигальский анализировал зависимость частоты возникновения онкологических заболеваний от уровня воздействия электромагнитного излучения [5]. Было обнаружено, что частотность этих заболеваний составляет 119 на 100 000 человек для персонала, обслуживающего установки с повышенным уровнем электромагнитного излучения, в то время как этот показатель равен 57 на 100 000 для остальных людей. Для молодых людей, имеющих злокачественные опухоли гемопоэтической и лимфатической систем, наибольшая разница между экспонированными и неэкспонированными категориями отмечается для случаев лейкемии и лимфомы, которые связаны с иммунокомпетентными клетками.

У многих людей имеются персональные компьютеры. Хотя и декларируется, что эти приборы абсолютно безвредны, они излучают электромагнитные волны. Замечено, что это излучение способствует проявлению мутагенного эффекта, нарушает функции желудка и желез, ослабляет память [6]. Электромагнитное излучение мобильных телефонов действует на центральную нервную систему, глаза, гонады [6]. Кроме этого, оно влияет на дисфункции сердечно-сосудистой, кровеносной, иммунной систем, нарушает метаболические процессы.

Шумовое излучение может иметь существенное влияние на жизненные функции человеческого организма, особенно в миллиметровом диапазоне [7]. Именно в этом диапазоне вода наиболее интенсивно поглощает электромагнитное излучение. В человеческой коже содержание воды составляет около 60 %. В связи с этим миллиметровые волны практически полностью поглощаются в слое кожи толщиной 0,7...1 мм и не достигают внутренних органов человека. Человеческий организм состоит примерно из  $10^{15}$  клеток, которые генерируют электромагнитные поля в миллиметровом диапазоне. Человек в здоровом и больном состоянии имеет различающиеся амплитудно-частотные ответы. Это означает, что любая патология является, прежде всего, патологией клетки. Внешнее электромагнитное излучение миллиметрового диапазона, к примеру, генерируемое с помощью IMPATT диодов [8], стимулирует собственное излучение организма в этом диапазоне у больного человека. Спектральная плотность шумового излучения различается для разных IMPATT диодов, хотя все из них имеют примерно одинаковый уровень, порядка  $10^{-19}$  Вт/Гц. У каждого человека собственное электромагнитное излучение генерируется на своих частотах, на которых шумовое излучение может оказывать влияние на человеческий организм.

Все эти данные говорят о необходимости разработки новых санитарных норм, содержащих величины безопасных уровней техногенного электромагнитного излучения. Особое внимание должно быть уделено таким источникам излучения, как телевизионные приемники, радиостанции, мобильные телефоны, линии электропередачи, системы радиокommunikации, телевидение, средства радионавигации, радиолокации, электротранспорт, бытовая и офисная техника [9].

Одной из главных причин отсутствия подобных санитарных норм является недостаточность исследований биологических эффектов электромагнитного излучения, особенно их зависимости от параметров излучения и условий воздействия. Чтобы определить заведомо безопасные уровни электромагнитного излучения, необходимо тщательно исследовать биологические эффекты при малых величинах интенсивности воздействующих волн. Однако само существование биологических эффектов низкоинтенсивного электромагнитного поля является в настоящее время предметом обсуждения. Несмотря на результаты многочисленных экспериментальных работ, некоторые физики отрицают возможность того, что электромагнитные кванты в диапазоне частот  $10^8...10^{11}$  Гц могут вызывать конформационные переходы в биомак-

ромолекулах, так как энергия кванта  $h\nu$  много меньше тепловой энергии среды  $kT$ . Например, в работе Ю.И. Кольчугина [10] оценивалось удельное поглощение электромагнитного излучения в биологических тканях в рамках макроскопической электродинамики. И было найдено, что поглощение энергии не может превышать  $kT/10$  при нетепловом уровне интенсивности падающей волны. Рассматривались следующие механизмы накопления энергии: 1) многофотонный процесс; 2) прямое воздействие электрического поля на ионы; 3) кооперативные эффекты и/или когерентные возбуждения. Обнаружено, что эти механизмы неэффективны с точки зрения трансформации энергии волны во внутреннюю энергию системы. Следует вывод, что нетепловые биологические эффекты невозможны в микроволновом диапазоне частот воздействующего электромагнитного излучения.

Все выводы о невозможности нетепловых эффектов электромагнитного излучения на биологические объекты основаны на утверждении, что эффективный механизм накопления энергии, достаточной для преодоления потенциального барьера между конформационными состояниями, не найден. Эта ситуация обусловлена тем, что не учитывается ряд физических особенностей взаимодействия биосистем и электромагнитного излучения.

Во-первых, особенностью биологических макромолекул является то, что их первичная структура сформирована в виде цепи субъединиц, имеющих внутренние колебательные движения с соответствующими собственными частотами и связанных друг с другом диссипативными, но не упругими (что очень важно) связями. При взаимодействии такой системы с электромагнитной волной в биомacroмолекуле может возбудиться колебательная мода (тип колебаний), при этом энергия этого типа колебаний не будет перераспределяться в другие типы [11]. Этот механизм дает возможность накопления энергии, достаточной для конформационного перехода, в одном из типов внутренних колебаний в биомacroмолекуле. Можно интерпретировать этот механизм несколько иначе: такое взаимодействие позволяет концентрировать энергию многих несинхронизованных внутренних колебаний в биомacroмолекуле в одном типе колебательных движений, синхронизованных внешним электромагнитным полем.

Вторая особенность взаимодействия биологических систем с электромагнитным излучением связана с длиной электромагнитной волны. Оппоненты нетепловых биологических эффектов электромагнитных волн СВЧ-диапазона предполагают малую вероятность многофотонных процессов. С термодинамической точки зрения это корректно для

области Вина в теории равновесного (теплого) излучения, где среднее число фотонов  $\rho$  для моды с определенной частотой не может быть больше единицы. Микроволновый диапазон относится к области Рэля-Джинса, где среднее число фотонов  $\rho > 1$ . В этом случае термодинамический предел эффективности трансформации энергии внешнего излучения в свободную энергию Гельмгольца будет равен 1 в некотором интервале поглощенной мощности [12]. В этом интервале энергия внешнего электромагнитного поля наиболее эффективно трансформируется в энергию внутренних колебаний, упорядоченных в системе внешним воздействием, включая многофотонные процессы. Этот вывод согласуется с предположением конденсации бозонов в структуре биологических мембран [13]. Аналогичный подход был использован при рассмотрении влияния электромагнитного поля на химические процессы в мембранах при передаче сигналов [14].

## **0.2. Характеристики электромагнитного излучения сверхвысоких и крайне высоких частот**

Наблюдения, сделанные к настоящему времени, показывают, что биологические эффекты электромагнитного излучения зависят от параметров воздействующих полей. Одним из наиболее важных параметров является интенсивность излучения. Оценкой интенсивности может служить либо плотность потока падающей мощности, либо напряженность электрической компоненты электромагнитного поля. Величина интенсивности определяет характер биологического эффекта, который может быть тепловым или нетепловым. Критерием такого разделения является температура биообъекта, облучаемого электромагнитными волнами. Если эта температура под действием облучения повышается не более чем на 0,1 К, уровень интенсивности рассматривается нетепловым, и электромагнитное излучение в этом случае называют низкоинтенсивным.

На практике удобно использовать характеристику падающего излучения, а именно: плотность потока падающей мощности. Сделаем оценку нетеплового уровня этого параметра на примере животного (мышь). Для этого обратимся к рис. 0.1, на котором схематически показана мышь, облучаемая потоком падающей мощности с плотностью  $P_{fall}$ .

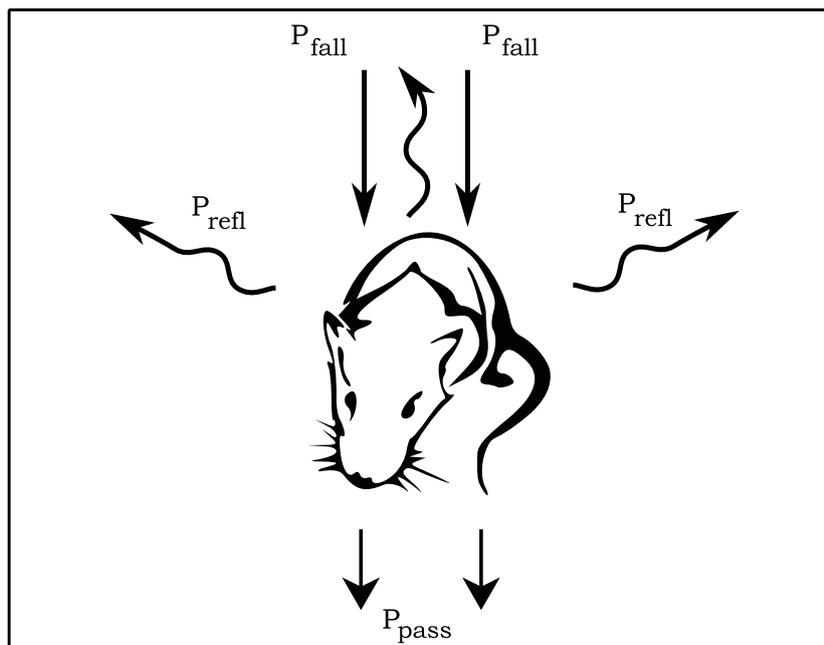


Рис. 0.1. Схема облучения животного электромагнитным излучением

Часть падающей мощности может пройти сквозь мышь. Поток после прохождения через животное будет иметь плотность  $P_{pass}$ . Некоторая доля падающей мощности будет отражаться от тела мыши из-за разности величин диэлектрической постоянной для воздуха и биологическими тканями. Плотность потока отраженной мощности обозначена на рис. 0.1 как  $P_{refl}$ , хотя численное значение этого параметра варьируется в зависимости от угла отражения. Поскольку измерение  $P_{pass}$  и, особенно,  $P_{refl}$  представляет большие технические трудности, обычно в эксперименте измеряют только плотности потока падающей мощности  $P_{fall}$ . В связи с этим целесообразно обойтись оценкой нижнего предела пороговой величины нетеплового уровня электромагнитного излучения, предполагая, что вся падающая мощность поглощается в теле животного.

Мы сделаем оценку для длительности экспозиции 30 мин, пренебрегая теплообменом между телом животного и окружающей средой. Кроме того, предположим, что удельная теплоемкость тела животного имеет величину 3 кДж/(кг·К), поскольку биологические ткани в среднем состоят на 75 % из воды [15]. При массе тела мыши около 20 г энергия, поглощенная животным, не должна превышать 6 Дж при условии, что прирост температуры тела  $\Delta t \leq 0,1$  К:

$$Q \leq cm\Delta T = 6 \text{ Дж}.$$

Чтобы выполнить это условие при времени экспозиции  $t_{exp} = 30$  мин и площади проекции тела мыши  $S_m = 10 \text{ см}^2$ , плотность потока падающей мощности должна быть равна:

$$P_{fall} = \frac{Q}{S_m t_{exp}} = \frac{6[\text{Дж}]}{10[\text{см}^2] \cdot 1,8 \cdot 10^3[\text{с}]} = 3,3 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2} = 330 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}.$$

Для человека эта величина примерно в 5 раз больше, поскольку для его тела отношение масса/площадь проекции равно  $10 \text{ г/см}^2$ , в то время как для мышцы оно составляет величину  $2 \text{ г/см}^2$ . Если учесть теплообмен тела с окружающей средой, а также тот факт, что часть падающей мощности отражается от тела, а не проходит сквозь него, то пороговая величина должна быть увеличена. Понятно, что такие оценки справедливы для частот, на которых в поглощении падающих волн участвует практически все тело. Специальные измерения показали, что в СВЧ-диапазоне температура тела человека возрастает на  $0,1 \text{ К}$  при уровне потока падающей мощности около  $5 \text{ мВт/см}^2$  при 30-минутной экспозиции. Необходимо также учитывать зависимость этого порога от продолжительности экспозиции. Чем меньше продолжительность экспозиции, тем более высок порог нетеплового воздействия электромагнитного излучения.

Следующим важным параметром электромагнитного излучения является его частота, поскольку нетепловые биоэффекты носят резонансный характер. Однако эта величина имеет смысл только при непрерывном или длинно-импульсном воздействии на фиксированной несущей частоте. Последний случай характеризуется тем, что длительность импульсов  $\tau_{imp}$  должна быть много больше периода колебаний  $T$ :  $\tau_{imp} \ll T = 1/f$ . В этом случае спектр амплитудно-модулированного излучения близок к спектру выходного сигнала реальных генераторов, работающих на фиксированной частоте в непрерывном режиме.

При амплитудной или частотной модуляции резонансное взаимодействие биообъектов с воздействующим излучением возникает с определенной периодичностью, задаваемой частотой повторения модулирующих импульсов. Эта частота повторения имеет также биологическую значимость, поскольку она может быть близка или кратна частоте ритмов электрической активности центральной нервной системы.

Во многих случаях, а именно: при частотной модуляции, амплитудной модуляции с малой длительностью импульсов и шумовом воздействии, имеет смысл говорить не о несущей частоте, а о частотном спектре или полосе частот электромагнитного излучения. Количественной характеристикой интенсивности воздействия в этом случае, помимо интегральной плотности потока падающей мощности, служит спектральная плотность излучения. Этот параметр является мерой мощности излучения, приходящейся на тот или иной частотный интервал:  $\Delta P/\Delta f$ .

Наконец, имеет смысл рассмотреть отдельно вопрос о частотном спектре ультакоротких импульсов, которые иначе называются сигналами с ультраширокой полосой. Это сделано в следующем параграфе.

### 0.3. Частотные характеристики электромагнитного излучения биологической значимости

Прежде всего, рассмотрим диапазоны частот, используемые в медицине в терапевтических или диагностических целях. Диаграмма, поясняющая положение дел на сегодняшний день в этом направлении, показана на рис. 0.2. Здесь же показаны частотные диапазоны генерируемых наиболее распространенными бытовыми приборами электромагнитных волн, где интенсивность техногенного излучения достаточно велика. Кроме того, в диаграмме использована радиотехническая терминология, которой придерживаются, как правило, производители генерирующих и передающих устройств.

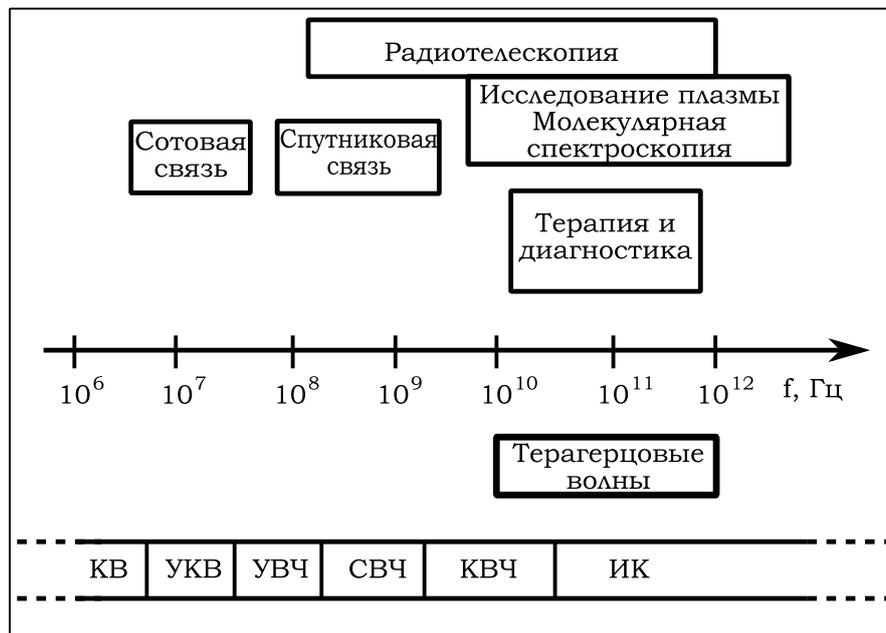


Рис. 0.2. Радиотехническая шкала частот

Из рис. 0.2 следует, что в радиотехнической шкале нет промежутков, и термин «терагерцовые волны» не входит в эту систему. Физики

пользуются несколько иной шкалой. В этой шкале идут последовательно метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые, субмиллиметровые волны, затем дальний и ближний инфракрасный свет, видимый диапазон, ближний и дальний ультрафиолет, рентгеновский и гамма-диапазоны. В этой шкале также нет промежутка для «терагерцовых волн».

С другой стороны, приставки кило, мега, гига, тера означают множители  $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$  и  $10^{12}$ , соответственно. Поэтому «терагерцовые волны» должны соответствовать частотам от  $10^3$  до  $10^6$  ГГц, то есть интервалу, охватывающему часть субмиллиметровых волн, инфракрасный диапазон и часть видимого диапазона. На самом деле под этим термином понимают диапазон от 100 до 100 000 ГГц. В чем же дело?

Есть две причины появления этого термина. С одной стороны, хотя в вышеприведенных шкалах и нет промежутка, существовал промежуток в освоении частотных диапазонов. Для освоения диапазона частот необходимы три составляющих: генераторы колебаний, разработанные волноведущие системы и диагностическая аппаратура. Со времен Герца и Попова радиотехники развивали эту технику, последовательно поднимаясь вверх по шкале частот и достигнув к концу прошлого века начало субмиллиметрового диапазона. С другой стороны, оптика развивалась от видимого диапазона в ультрафиолетовую и инфракрасную области. В силу этих исторических причин частотный интервал, к которому приписывают «терагерцовые волны», стали осваивать в последние годы.

Вторая причина состоит в том, что этот диапазон оказался очень интересным с точки зрения его применения, особенно в медицине. Он обладает лучшими свойствами своих соседей. Как и радиоволны, он проникает сквозь непрозрачные для видимого света материалы (исключая металлы). Однако волны этого диапазона можно фокусировать, как свет, и использовать законы геометрической оптики при построении электродинамических систем.

### *Список литературы к главе*

1. Verschaeve L. Can non ionizing radiation induce cancer? // Cancer J. — 1995. — № 5. — P. 237–249.
2. Trosko J.E. Human health consequences of environmentally modulated gene expression: potential roles of ELF-EMF induced epigenetic versus mutagenetic mechanisms of disease // Bioelectromagnetics. — 2000. — № 21(5). — P. 402–406.

3. Juutilainen J., Seze de R. Biological effects of amplitude-modulated radio-frequency radiation // *Scand. J. Work, Environ. and Health.* – 1998. – № 4. – P. 245–254.
4. Goldsmith J.R. Epidemiological studies of radio-frequency radiation: Current status and areas of concern // *Sci. Total Environ.* – 1996. – № 1. – P. 3–8.
5. Szmigielski S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation // *Sci. Total Environ.* – 1996. – № 1. – P. 9–17.
6. Маленко О.Г., Тупицына Т.В. Воздействие излучения от видеомониторов на человеческий организм // Доклады XXXIV и XXXV научно-технических конференций Хабаровского технического университета. – Хабаровск, 1966. – С. 96.
7. Буров А.Л. Экологические аспекты электромагнитного излучения мобильных станций систем связи / А.Л. Буров, Ю.И. Кольчугин, Ю.П. Пальцев // *Охрана труда и промышленная экология.* – 1966. – № 9. – С. 17–19.
8. Medical application of noise radiation of INPATT diode / Ya. Savenko [et al.] // *AmerEM 2000.* – Report 1-2-2. – P. 30.
9. Grigoryev Yu. G. Man in electromagnetic field (present situation, expected effects and danger estimate) // *Radiation biology and radioecology.* – 1997. – № 4. – P. 690–702.
10. Кольчугин Ю.И. К вопросу о санитарных нормах электромагнитного излучения в диапазоне 300...3000 МГц // *Охрана труда и промышленная экология.* – 1996. – № 9. – С. 20–23.
11. Pickard W.F., Moros E.G. Energy deposition processes in biological tissue: nonthermal biohazards seem unlikely in the ultra-high frequency range // *Bioelectromagnetics.* – 2001. – № 22(2). – P. 97–105.
12. Карнаухов А.В., Пономарев В.О. Диссипативный резонанс – новый класс физических явлений. Некоторые подходы к аналитическому описанию // *Биомедицинские технологии и электроника.* – 2001. – № 8. – С. 23–31.
13. Чукова Ю.П. Открытие нетепловых резонансных эффектов электромагнитного излучения миллиметрового диапазона – начало новой биофизики // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». – М., 1995. – С. 132–136.
14. Frohlich H. The Biological Effects of Mikrowaves and Related Questions // *Advances in Electronics and Electron Physics.* – 1980. – № 53. – P. 85–110, 143–152.
15. Neumann F. Digression on chemical electromagnetic field effects in membrane signal transduction – cooperativity paradigm of the acetylcholine receptor // *Biochemistry.* – 2000. – № 52(1). – P. 43–49.

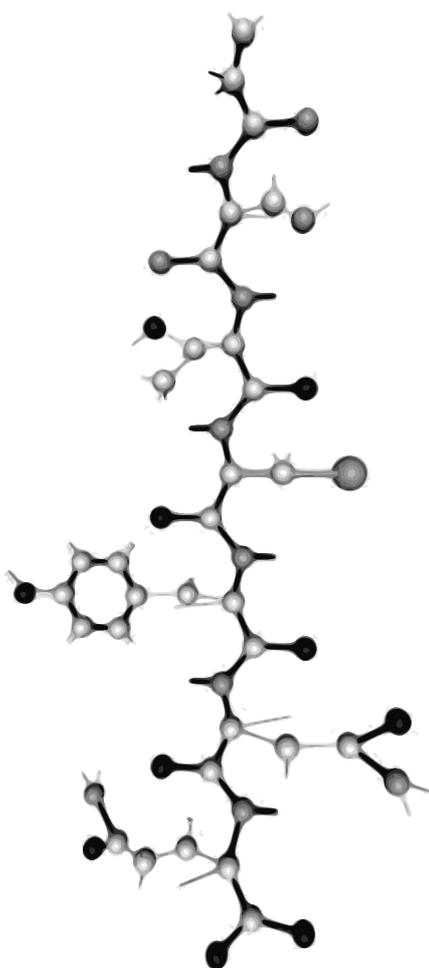
## **1. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ РАЗЛИЧНОГО УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ**

В предыдущей главе были приведены рассуждения на тот предмет, что сама возможность биологических эффектов электромагнитного излучения с частотой  $10^{11}$  и ниже определяется тем фактом, существует ли первичная рецепция электромагнитных волн, то есть имеется ли какой-либо физический механизм взаимодействия биологических структур с электромагнитным полем нетепловой интенсивности, приводящий к изменению функциональной активности этих структур. В этой связи важно понимать, что может происходить при таком взаимодействии на микроскопическом уровне. В этой главе будут рассмотрены эффекты электромагнитного излучения на молекулярном и клеточном уровнях.

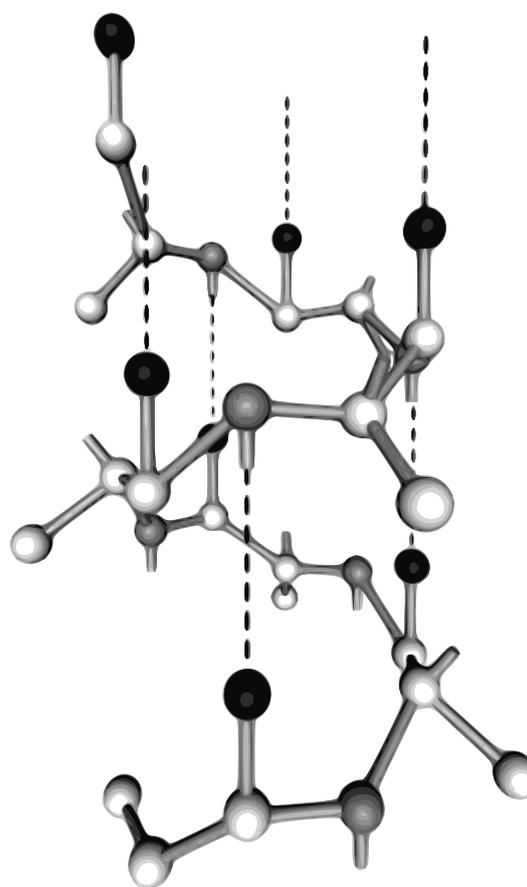
### **1.1. Белки как возможные рецепторы электромагнитного излучения**

Анализируя результаты исследований воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты различного уровня организации, нетрудно заметить, что большинство, если не все эффекты, можно объяснить изменением функциональной активности белков. Это касается и транспортных белков, и ферментов, определяющих биохимические процессы, а также биомакромолекул, встроенных в мембраны. Структура белковых молекул допускает возможность многих конформационных состояний. Функциональная активность белковой молекулы в большой степени зависит от того, в каком из этих конформационных состояний она находится.

Переходы между конформационными состояниями в белковых молекулах происходят непрерывно, но их динамика и направленность определяются условиями среды, окружающей молекулу белка. Одним из таких внешних факторов является электромагнитное излучение, которое может сдвинуть динамическое равновесие в том или ином направлении. Возможность накопления в биологических молекулах энергии, достаточной для преодоления потенциального барьера между конформационными состояниями, связана с возбуждением акустических колебаний в биологических структурах. Важным условием для реализации такого процесса накопления является диссипативность связей между внутренними осцилляторами, роль которых могут выполнять боковые группы аминокислотных остатков в белковой цепи или полярные молекулы воды в гидратной оболочке белковой молекулы. Пример такой белковой цепи показан на рис. 1.1.



*Рис. 1.1. Первичная структура белковой молекулы*



*Рис. 1.2. Вторичная структура белковой молекулы*

Электрические заряды или диполи в этих осцилляторах взаимодействуют с электрической компонентой падающей электромагнитной волны. Это взаимодействие может вызвать колебания отдельных составляющих белковой цепи. Диссипативная связь между осцилляторами обеспечивает синхронизацию этих колебаний и за счет этого возрастание амплитуды даже в случае низкой интенсивности возбуждающего электромагнитного излучения [1]. В определенной степени можно говорить, что внешнее воздействие не накачивает энергию, необходимую для конформационного перехода, а организует для этого энергию внутренних колебаний биомолекулы путем их синхронизации.

Существенное увеличение амплитуды определенного типа внутренних колебаний приводит к конформационному переходу в белковой молекуле. Синхронизация имеет место, когда частота возбуждения близка или кратна собственной частоте колебательной системы. Поскольку боковые группы белковой молекулы имеют разную длину, массу и систему связей (рис. 1.2), то спектр собственных частот и, соответственно, частот взаимодействия будет широким.

Похожая модель взаимодействия биологических систем с электромагнитным излучением описывалась в работе А.Р. Каримова [2]. Рассматривалась линейная цепь мономеров, связанных между собой диполь-дипольным взаимодействием. Роль мономеров могут выполнять нуклеотидные пары, содержащие азотные основания ДНК, или пептидные остатки в белковой цепи. Взаимодействие с электрической компонентой электромагнитного поля приведет к возбуждению колебаний в мономерах с участием диполей. Решение, найденное методом матричной алгебры для вынужденных колебаний, показывает наличие резонансных частот, на которых воздействие электромагнитной волны на белковую молекулу наиболее сильное.

Молекула гемоглобина является удобной моделью для экспериментальных исследований взаимодействия электромагнитного излучения с белковыми молекулами. В одном из первых экспериментов [3] с помощью мессбауэровской спектроскопии изучалась быстрая динамика в молекуле гемоглобина кролика под воздействием миллиметровых волн и без такового. Мессбауэровская спектроскопия позволяет наблюдать динамическое поведение боковых групп этого белка, расположенных вблизи гема, с характерными временами  $\sim 10^{-7}$  с, получая информацию путем измерения параметров, так называемой, «квазиупругой» линии мессбауэровского спектра. Результаты эксперимента показали, что электромагнитное излучение не оказывает влияние на средние величины параметров «квазиупругой» линии, но данное воздействие существенно меняет

распределение амплитуд этой линии. Интерпретация результатов в рамках модели броуновского осциллятора с затуханием позволяет говорить об увеличении амплитуд низкочастотных колебаний в молекуле гемоглобина под воздействием электромагнитного излучения.

Структурные изменения в белковых молекулах тесно связаны с их функциональной активностью. Впервые этот аспект был затронут в гипотезе «белок-машина» [4], выдвинутой для рассмотрения взаимодействия белковых молекул с электромагнитным полем. Структура белковых молекул определяется как системой связей между пептидными остатками в белковой цепи, так и связями пептидов с молекулами воды в гидратной оболочке. Примером такой структуры может служить главная составляющая кожи – коллаген. Этот белок очень гидратирован [5]. Наибольшая гидратация коллагена характерна для участков кожи вблизи суставов, где увеличена концентрация механорецепторов (тельца Руффини). Гидратированный коллаген обладает электрическими и пьезоэлектрическими свойствами. Его структура и, следовательно, размерные изменения под воздействием электромагнитного излучения могут вызывать спонтанную активность телец Руффини, формируя сигнал в центральную нервную систему.

Таким образом, рассмотренные примеры взаимодействия белковых молекул с электромагнитным излучением позволяют считать эти макромолекулы одними из главных претендентов на роль реципиентов электромагнитных волн. Этот аспект рассмотрен в § 1.2. Параграф 1.3 посвящен изменению проницаемости биологических мембран под действием электромагнитных волн. Влияние электромагнитного излучения на прохождение нервного импульса рассмотрено в § 1.4. Эффекты электромагнитных волн на биологические свойства микроорганизмов являются темой § 1.5. Следующий параграф содержит обзор некоторых результатов исследований влияния электромагнитного излучения на метаболические процессы в клетках. Эти процессы связаны с активностью клетки как целого и, особенно с митотическим делением, которое рассмотрено в § 1.7. Состояние мембран определяет взаимодействие с поверхностью (адгезивность) и клетки с клеткой (кооперативность). Влияние электромагнитного излучения на эти свойства рассмотрено соответственно в § 1.8 и 1.9. Воздействие электромагнитного излучения на клетки может быть столь сильным, что это может привести к смерти клетки. Эта ситуация является темой § 1.10. Наконец, § 1.11 посвящен эффектам электромагнитного излучения на злокачественные опухоли.

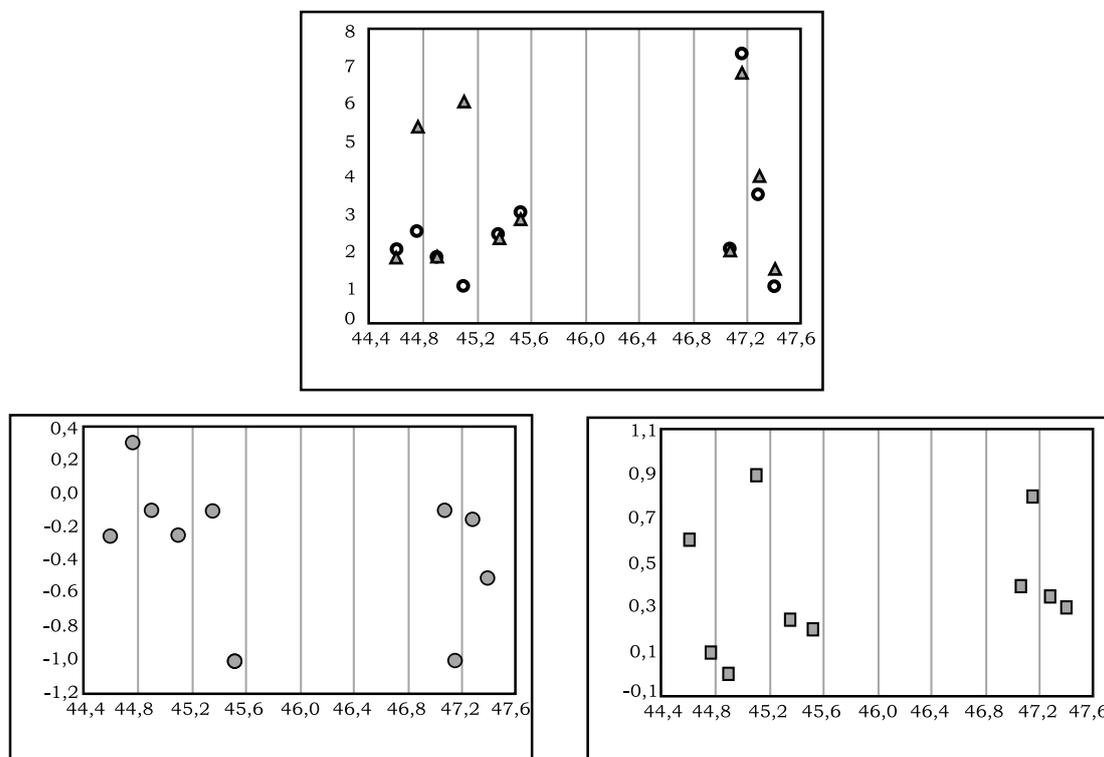
## 1.2. Действие электромагнитного излучения на конформационные состояния в белках

Модели взаимодействия электромагнитного излучения с белковыми молекулами, рассмотренные в § 1.1, показывают возможность синхронизации внутренних колебаний некоторых цепей и за счет этого концентрации энергии, достаточной для изменения конформации в макромолекулах. Экспериментальные подтверждения существования конформационных переходов под действием электромагнитного излучения были получены в ряде работ. Прежде всего, к ним относятся мессбауэровские измерения, выполненные на молекулах гемоглобина. Результаты этих измерений приведены в работе Н.П. Диденко [6]. Мессбауэровская спектроскопия дает очень точную информацию о распределении электрического поля и, следовательно, структуре молекулы вблизи мессбауэровского изотопа. В гемоглобине таким изотопом является  $^{57}\text{Fe}$ . Он расположен в центре гемового комплекса, окруженного белковой частью глобулы. Переход молекулы гемоглобина в новое конформационное состояние сопровождается изменением электрического поля на ядре изотопа  $^{57}\text{Fe}$ , что проявляется в изменении параметров мессбауэровского спектра белка. Результаты измерений показаны на рис. 1.3.

В диапазоне 44,50...50,36 ГГц было найдено 10 значений частоты, на которых наблюдалось взаимодействие электромагнитного излучения с молекулами гемоглобина. Это взаимодействие проявлялось в мессбауэровских спектрах как появление дополнительного дублета линий, соответствующего новому конформационному состоянию. Параметры этих дублетов, появившихся при взаимодействии на резонансных частотах, показаны на рис. 1.3. Необходимо отметить, что отклик молекул гемоглобина на воздействие электромагнитного излучения на различных частотах не носит одинаковый характер. Вероятно, каждая резонансная частота соответствует переходу в свое, связанное с этой частотой, конформационное состояние, что свидетельствует о большом объеме конформационного пространства. Однако, этот факт кажется удивительным, поскольку атом железа в гемоглобине имеет одновременно связи лишь с несколькими частями глобулы.

Данный вывод подтверждается результатами мессбауэровских исследований взаимодействия молекулы гемоглобина с электромагнитным излучением при гелиевых температурах [7]. В этом случае мессбауэровский спектр гемоглобина содержит два подспектра. Один из них — хорошо разрешенный дублет линий, соответствующий низкоспиновой

компоненте гемоглобина. Другой подспектр имеет форму асимметричного дублета уширенных линий. Он принадлежит высокоспиновой компоненте метгемоглобина с промежуточным временем релаксации, недостаточным для полного разрешения сверхтонкой магнитной структуры.



*Рис. 1.3. Параметры дополнительных дублетов в мессбауэровских спектрах гемоглобина: белые круги — отношение ширин линий; серые треугольники — отношение площадей линий; серые круги — квадрупольное расщепление; серые квадраты — химический сдвиг*

При резонансном взаимодействии молекулы гемоглобина с электромагнитным излучением параметры первого дублета практически не меняются, в то время как параметры высокоспинового подспектра на резонансных частотах взаимодействия с миллиметровыми волнами изменяются значительно, что говорит о конформационных переходах именно в этой компоненте метгемоглобина. Более того, отношения площадей линий, соответствующих обоим компонентам, остаются по величине неизменными, и это значит, что индуцированные переходы не носят спиновый характер. Таким образом, результаты измерений говорят о том, что переход глобулярной биомолекулы из одного конформационного состояния в другое под действием электромагнитного излучения сопровождается перестройкой системы внутренних связей в третичной структуре белка.

Конформационные переходы в белковых молекулах тесно связаны со структурой внутренних движений в биомакромолекулах. Мессбауэровские измерения воздействия электромагнитных волн на динамику гемоглобина [8, 9] показали, что взаимодействие на резонансных частотах увеличивает интенсивность переходов в определенном конформационном подпространстве. Мессбауэровские спектры свидетельствуют об общей стабилизации молекулярной структуры под воздействием электромагнитного излучения. Это свидетельствует о синхронизации внутренних движений в белковой молекуле электромагнитным полем. Следовательно, электромагнитное излучение действует наиболее эффективно на те конформационные состояния, которые имеют собственные частоты, близкие к частоте внешнего генератора. Увеличение амплитуды этих колебаний ведет к конформационному переходу.

Изменения в структуре связей белковых молекул также фиксировались с помощью инфракрасной спектроскопии. В работе Л.В. Калюжной [11] этим методом исследовалось влияние электромагнитного излучения на плазму крови. Было обнаружено, что облучение электромагнитными волнами ведет к изменениям инфракрасных спектров, связанных с разрушением водородных связей. В работе Т.В. Ченской и И.Я. Петрова [12] были измерены инфракрасные спектры лецитина и сывороточного альбумина человека при облучении электромагнитным излучением с длиной волны 8,6 мм и плотностью потока падающей мощности 50 мВт/см<sup>2</sup>. Эти спектры показали, что миллиметровые волны не вызывают необратимых изменений во вторичной структуре белковых молекул, включая фазовые переходы в липидах и переходы от  $\alpha$ -спиралей к  $\beta$ -изгибам. Однако электромагнитное излучение модифицировало динамику белков, что проявилось в увеличении водородного обмена в сывороточном альбумине человека. Этот эффект был полностью обратим.

Возможность конформационных изменений в белковых молекулах под воздействием электромагнитных волн исследовалось иммунологическим методом [13] по реакции связывания антител со специфическими антигенами. Эта реакция требует высокой степени химического и пространственного соответствия детерминантных групп. Поэтому измерения степени связывания позволяют оценить пространственное соответствие секторов связи и, соответственно, конформационное состояние молекулы.

### 1.3. Вероятность изменения состояния мембраны клеток

В предыдущем параграфе была показана возможность индуцированных конформационных переходов в белковых молекулах при воздействии электромагнитными волнами. В этом параграфе мы рассмотрим, как проявляются конформационные изменения белковых молекул в функционировании клеточных мембран.

Изменения состояния воротных и других белковых молекул под воздействием электромагнитного излучения может быть определено по модификации их функциональных свойств. В этой связи исследования откликов клеточных мембран на действие электромагнитных волн представляет большой интерес.

Выполнен ряд исследований, посвященных изучению эффектов электромагнитного излучения на состояние мембран эритроцитов. Влияние миллиметровых волн на резистентность мембран эритроцитов исследовалось в работе А.С. Корягина [14] с использованием шумового сигнала в полосе частот 53...78 ГГц со спектральной интенсивностью  $\sim 6 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц, что соответствует интегральной мощности  $\sim 1,5$  мкВт. Был обнаружен рост резистентности мембран. В контрольном эксперименте полный гемолиз эритроцитов наступал при концентрации NaCl, равной 0,35 %, в то время как при действии электромагнитного излучения он происходил при концентрации 0,23 %. В обоих случаях начало гемолиза наблюдалось при 0,55 %.

Было установлено, что облучение миллиметровыми волнами приводит к уменьшению концентрации одного из продуктов перекисного окисления липидов в крови. Это является индикатором уменьшения скорости процессов, связанных с образованием свободных радикалов. Известно [15], что ослабление гидрофобных связей сопровождается интенсификацией перекисного окисления липидов в мембранах и наоборот. Данные, приведенные выше, показывают усиление гидрофобных взаимодействий в мембранах клеток под влиянием электромагнитного излучения.

Увеличение резистентности мембран может быть объяснено и другим механизмом, а именно: модуляцией активности мембранной ферментной системы. Для того, чтобы проверить возможность такого механизма, было проведено исследование на следующих ферментах: а) аланинаминотрансфераза, которая является катализатором реакции обратимого переноса от аланина к  $\alpha$ -кетоглутариновой кислоте и имеет молекулярную массу 114 дальтонов; б) амилаза, которая относится к классу гидрогеназ и является катализатором реакции гидролитическо-

го расщепления гликозидных связей в крахмале и гликогене, ее молекулярная масса равна 48 дальтонам [16]. Электромагнитное излучение не действовало на первый фермент, но увеличивало эффективность второго в 1,7 раза. Ферменты отличаются один от другого, во-первых, величиной молекулярной массы и, следовательно, частотой собственных колебаний, и, во-вторых, тем, что для амилазы в реакции необходима вода, а для аланинаминотрансферазы – нет. Это различие обуславливает резонансное взаимодействие электромагнитного излучения с амилазой, которое изменяет ее пространственную структуру и переводит ее в более активную форму, так как в растворе этот фермент имеет несколько различных конфигураций [16]. Необходимо отметить, что целый ряд ферментов можно отнести к классу гидрогеназ. Это ферменты энергетического обмена и ферменты, связанные с поддержанием мембранного потенциала и передачей нервного импульса, к примеру,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ -АТФаза,  $\text{Ca}^{2+}$ -АТФаза.

Косвенную информацию о состоянии мембраны эритроцитов можно получить из измерений такого параметра, как электрофоретическая подвижность этих клеток. Она зависит от распределения заряда на поверхности мембраны. В работе С. Иванова, М. Кужмановой [17] изучалось, как влияет электромагнитное излучение с длиной волны 5,6 мм на электрофоретическую подвижность эритроцитов крысы. В эксперименте использовались три группы животных: контрольная, подвергшаяся облучению электромагнитными волнами, подвергшаяся комбинированному облучению электромагнитными волнами и  $\gamma$ -излучением. Результаты эксперимента показали, что миллиметровые волны увеличивают электрофоретическую подвижность эритроцитов в первые дни, но она возвращается в дальнейшем к контрольной величине. Облучение  $\gamma$ -лучами приводит к уменьшению этого параметра в течение всего периода наблюдения, но воздействие электромагнитного излучения перед  $\gamma$ -облучением в большей степени компенсирует эффект уменьшения. Облучение  $\gamma$ -лучами вызывает конформационные изменения в мембранах эритроцитов, что приводит к перераспределению зарядов. Миллиметровые волны также изменяют структуру мембраны, но эти изменения имеют другое и, в определенной степени, противоположное направление – они стабилизируют состояние мембраны перед последующим  $\gamma$ -облучением.

Похожие результаты были получены в исследованиях влияния электромагнитного излучения в полосе частот 53...78 ГГц в шумовом режиме на изолированных эритроцитах крыс [18]. Спектральная плотность падающей мощности была равна  $4 \cdot 10^{-17}$  Вт/Гц, неоднородность

поля была в пределах  $\pm 3$  дБ, и интегральная мощность составляла 1 мкВт. Воздействие электромагнитного излучения с такими параметрами также приводило к увеличению электрофоретической подвижности.

В экспериментах с фототрофными микроорганизмами *Spirulina platensis* [19] было обнаружено, что облучение этих клеток миллиметровыми волнами вызывало изменение скорости роста на различных стадиях, концентрации ионов натрия и нитратов в культуральной среде. Нужно отметить, что транспорт ионов натрия в клетку является быстрым процессом, так как направление движения совпадает с градиентом электрохимического потенциала. Наоборот, вывод нитрат-иона из клетки – процесс медленный и зависит от освещенности и метаболической активности. Поэтому изменения проницаемости мембраны проявляется, в первую очередь, в отношении ионов натрия, что обуславливает соответствующую динамику концентрации этого иона.

Необходимо уделить внимание также экспериментам с мощными СВЧ-импульсами наносекундной длительности, так как напряженность электрического поля в таком излучении сравнима с напряженностью в мембране (50...300 кВ/см). Было найдено, что действие таких мощных импульсов (с длиной волны 3 см, длительностью импульса 10 нс и пиковой мощностью 30 МВт) на мембраны кожи лягушки приводило к ускорению активного транспорта ионов натрия и увеличению проницаемости мембраны для молекул воды [20].

Действие электромагнитного излучения с частотой 75 ГГц и интегральной мощностью 8 мВт на быстрый калиевый ток в нейроне моллюска изучалось в работе С.И. Алексеева [21]. Результаты показали, что воздействие приводило к уменьшению временных констант активации и инактивации на 7,5 и 16 %, соответственно. Скорость инактивации возрастает больше, чем у активации. Это означает, что электромагнитное излучение действует эффективно на функционирование быстрых калиевых каналов, что может быть объяснено конформационными изменениями воротных молекул.

## 1.4. Изменения в прохождении нервного импульса

Изменения в функционировании воротных молекул, рассмотренные в предыдущем параграфе, тесно связаны с прохождением нервного импульса. Последнее значимо с точки зрения отклика организма в целом на электромагнитное воздействие. Поэтому исследования влияния электромагнитных волн на процесс прохождения нервного импульса очень важны для понимания реакции организма на это воздействие.

В экспериментах с препаратами изолированного пузыря лягушки [22] изменения спонтанной импульсной активности кустиковидных рецепторов измерялись на отведении нерва пузыря. Облучение этого препарата электромагнитным излучением с частотой 42,194 ГГц увеличивало среднюю суммарную частоту импульсной активности. Динамика изменений относительной величины этого параметра под действием электромагнитного излучения показана на рис. 1.4 в сравнении с соответствующими величинами для контроля и инфракрасного облучения.

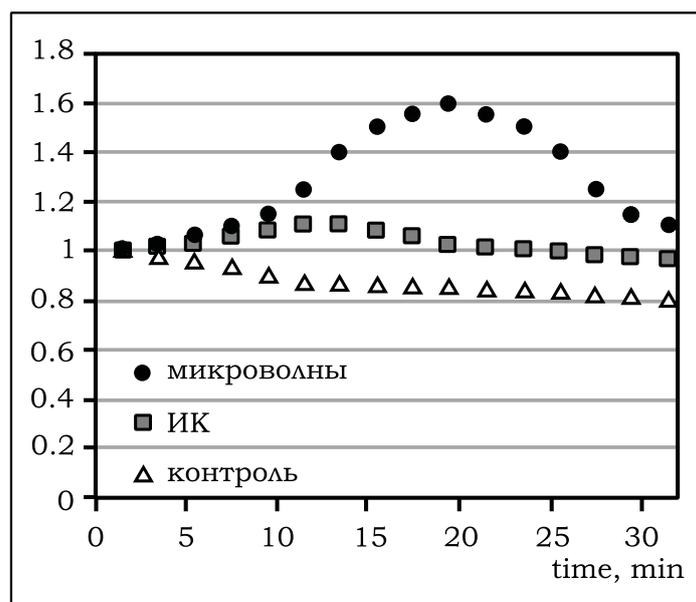


Рис. 1.4. Зависимость частоты спонтанной импульсной активности нерва лягушки от времени

На рис. 1.4 показано, что электромагнитные волны влияют на кустиковидные рецепторы иначе, чем тепловое воздействие, обусловленное инфракрасным облучением. Электромагнитное излучение увеличивает частоту фоновой активности этих рецепторов, хотя и наблюдается частичная адаптация в процессе воздействия. Механизм такого действия может быть связан с рецепцией электромагнитного излучения в зоне иннервации потенциалов действия.

Отклики рецепторов на воздействие электромагнитного излучения на частотах в интервале 40,00...42,25 и 42,31 ГГц были исследованы в работе Н.Г. Желтова [23]. Механорецепторы кожи лягушки в полуинтактном состоянии, так же как и изолированные кожно-нервные препараты, облучались электромагнитными волнами. Аfferентный поток нервных импульсов при механическом стимулировании рецепторов регистрировали, используя внешнее отведение от ветви дорсального нерва, иннервирующего область облучения. При максимальной величине плотности потока падающей мощности ( $\sim 35$  мВт/см<sup>2</sup>) повышение температуры составляло 1...2 °С.

Первая серия экспериментов была выполнена в температурном интервале 18...22 °С, то есть в диапазоне тепловой нейтральности для механорецепторов лягушки, который равен 13...26 °С, что позволяет говорить о нетепловом действии электромагнитного излучения на механорецепторы. Однако воздействие электромагнитных волн не привело ни к активации спонтанной активности, ни к модификации отклика. Во второй серии измерений, выполненной в термочувствительном диапазоне температур для механорецепторной системы 27...30 °С, было обнаружено, что облучение электромагнитным излучением с частотой 48 ГГц приводило к уменьшению индуцированной активности механорецепторов.

Рецепция электромагнитного излучения возможна и непосредственно в нервных волокнах. В этом случае электромагнитное поле модифицирует прохождение нервного импульса. В работе А.Ю. Сазонова [24] исследовалось влияние электромагнитного излучения с частотой 42,19 ГГц на функционирование нерва травяной лягушки. Измерялось время восстановления амплитуды потенциала действия после возбуждения электрическими импульсами при облучении в трех режимах: а) перед стимуляцией; б) во время восстановления; в) перед возбуждениями во время восстановления. Во всех трех режимах было зафиксировано уменьшение времени восстановления на 20...40 % по сравнению с контрольными величинами.

Действие электромагнитных волн на нервные волокна может быть не только стимулирующим, но и тормозящим. В работе Г. Бурачас [25] также исследовалось влияние электромагнитного излучения на седалищный нерв лягушки. При воздействии миллиметровых волн неуказанной частоты амплитуда потенциала действия уменьшалась экспоненциально до нуля. После окончания сеанса облучения амплитуда постепенно восстанавливалась.

Приведенные выше данные позволяют выделить две особенности влияния электромагнитного излучения на прохождение нервного импульса при воздействии на рецепторы и нервные волокна. Во-первых, эффект зависит от частоты, что согласуется с гипотезой резонансного взаимодействия излучения с молекулами функционально компетентных белков. Во-вторых, наличие отклика на предварительное облучение электромагнитными волнами препаратов и значительное время развития эффекта свидетельствуют о медленной релаксации конформационных изменений в белковых молекулах.

Помимо действия на рецепторы и нервные волокна, прохождение нервного импульса может быть модифицировано рефлекторно. Пример такой ситуации приведен в работе Ю. Гапонюк [26]. У восемнадцати из двадцати пациентов с гипертонзией было обнаружено увеличение частоты повторения потенциалов действия в афферентных волокнах срединного нерва левой руки при облучении в течение 1 мин участка кожи вблизи точки акупунктуры 9.9 канала перикарда. Частота электромагнитного излучения изменялась в полосе частот от 53,596 до 53,603 ГГц с частотой амплитудной модуляции 0,05 Гц. Плотность потока падающей мощности была менее 5 мВт/см<sup>2</sup>. Частотный анализ электроэнцефалограмм показал увеличение мощности спектрального интервала  $\alpha$ -ритма по сравнению с фоновым уровнем этих пациентов. Блокирование срединного нерва между зоной облучения и зоной измерения потенциалов действия приводило к уменьшению частоты фоновой импульсной активности и мощности спектра ЭЭГ у всех пациентов. Облучение электромагнитным излучением не вызывало изменений этих параметров.

### **1.5. Влияние электромагнитного излучения на биологические свойства микроорганизмов**

Выше была отмечена роль конформационных изменений белковых молекул для функционирования клеточных мембран. Однако такие изменения важны не только для мембранных белков, но и для других молекул, определяющих биологические свойства клеток, особенно для их роста. В экспериментах с культурами *E.Coli* и *S.Aureus* [27] были найдены частоты излучения, воздействие которых на эти культуры из-

меняло их рост. Облучение на некоторых из этих частот приводило к стимуляции роста, а на других – к подавлению. Нужно отметить, что не было обнаружено связи между уровнем мощности электромагнитного излучения и степенью его биологического действия на эти бактерии.

Помимо биохимических реакций, важных для роста клеток, воздействие электромагнитного излучения может приводить к изменению структуры клеток, как это было показано, например, в экспериментах с микробами коклюша [28]. Исследования позволяют заключить, что воздействие электромагнитного излучения на некоторых частотах ведет к изменению иммунологических свойств этих клеток. Эти свойства оценивались по наличию поверхностных антигенов – агглютиногенов 1, 2 и 3. Оказалось, что клетки увеличивают синтез агглютиногена 1 под воздействием электромагнитного излучения с длиной волны 6,39; 7,00 и 7,80 мм и уменьшают синтез этого антигена при облучении на длине волны 6,90 мм. Воздействие электромагнитными волнами с длинами волн 6,59 и 6,00 мм вызывало значительное снижение уровня синтеза этими микробами агглютиногенов 2 и 3.

В работе Л.С. Холодной [29] было показано, что миллиметровые волны модифицируют иммунологические свойства антигенов стафилококка. Кроме того, было обнаружено, что основной патогенный фактор стафилококка – белок А – изменяет свою способность взаимодействия с иммуноглобулинами после облучения электромагнитными волнами. Исследования эффектов электромагнитного излучения на фотосинтезирующие микроорганизмы *S. Platensis* и *P. Vividis* [30] показали, что такое воздействие стимулирует рост этих микроорганизмов, увеличивает содержание хлорофилла в клетках и интенсифицирует выход кислорода. В этой работе подтверждается, что первичное действие электромагнитного излучения по изменению проницаемости мембран и, соответственно, транспорта ионов натрия и нитрат-ионов приводит к смещению равновесия между дыханием и фотосинтезом в направлении последнего.

Аналогичные исследования на бактериях *B. Subtilis* [31] показали наличие частот, на которых воздействие электромагнитного излучения стимулировало рост биомассы и производительность по белку. Были также найдены частоты, воздействие на которых подавляло функциональную активность этих микроорганизмов. Стимуляция проявлялась в увеличении биомассы на 30 %, а подавление – в уменьшении на 50 % относительно контрольных величин. В то же время концентрация белка возрастала на 70 % при облучении электромагнитными волнами на стимулирующей частоте и уменьшалась лишь на 5 % на ингибирующей

частоте. Таким образом, миллиметровые волны изменяют метаболизм бактерий *B. Subtilis*, но модифицируют не весь процесс в целом, а влияет на различные метаболические реакции в зависимости от действующей частоты.

Влияние электромагнитного излучения на рост микроорганизмов отличается на разных стадиях развития культуры клеток. С культурой *Spirostomum.sp* были выполнены два варианта экспериментов [32]: а) облучение культуры электромагнитным излучением во время формирования популяции; б) облучение электромагнитным излучением культуры с несформированной популяцией по причине ограниченного объема чашки Петри. Культуры имели возраст 6 дней и облучались электромагнитным излучением с длиной волны 7,1 мм в течение 30 мин.

В первой серии экспериментов популяционные отношения были сформированы в контроле, но облучение на 2-й, 4-й и 7-й дни приводило к значительно более раннему появлению популяции. Кривая роста совпадала с контрольной кривой только при облучении на стадии, когда популяция почти сформировалась (9–11-й дни). В этом случае регуляторные механизмы доминировали над электромагнитным воздействием.

Во второй серии экспериментов в контрольной группе популяция не сформировалась. Облучение электромагнитным излучением на разных стадиях роста культуры приводило к стабилизации, проявлявшейся в формировании популяционных отношений. При облучении на стадиях быстрого роста (4-й, 7-й и 9-й дни) генерируемая популяция была более стабильна, чем при облучении на стадии инокуляции (второй день).

Экспериментальные данные показывают, что электромагнитное излучение может воздействовать на микроорганизмы на генетическом уровне. Изменения в геноме *E. Coli* под действием миллиметровых волн исследовалось в работе А.В. Гусева [33]. Было найдено, что излучение активирует лизогенный профаг  $\lambda$ -хромосомы и ген  $\beta$ -галакто시다зы (лактозы) плазмиды в клетках *E. Coli*. Экспрессия этих оперонов блокируется в норме  $C1$ -репрессором  $\lambda$ -фага.

Облучение лизогенных клеток К-12 в условиях роста показало наличие нескольких частот, на которых усилении экспрессии фага составляло 5...6 порядков относительно фона. Вблизи одной из этих частот исследовали зависимость индукции гена  $\beta$ -галакто시다зы в культуре CSH 36 от частоты электромагнитного излучения. Максимальная индукция гена была зафиксирована в интервале частот 70,5...70,7 ГГц, так что относительная ширина резонанса составила  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ .

## 1.6. Влияние электромагнитного излучения на метаболические процессы на клеточном уровне

Модификация свойств микроорганизмов, описанная выше, обусловлена в значительной степени изменениями в метаболическом процессе, особенно в отношении роста клеток. Поэтому в этом параграфе внимание уделено влиянию электромагнитного излучения на клеточный метаболизм.

Эксперименты с культурой *E. Coli* [27] показали корреляцию между влиянием электромагнитного излучения на скорость роста этой культуры и действием этого фактора на параметры белков фосфолипидного и энергетического обмена в клетке и активности ее дегидрогеназ. Фотосинтезирующие бактерии *Ph. Leognathi* были объектом исследований влияния электромагнитного излучения на структуру мембраны, регулирующей метаболические процессы в клетках [34]. Преимущество изучения таких микроорганизмов заключается в возможности получения информации об эффектах электромагнитного излучения на жизненные функции клеток интактным путем, используя световой отклик биохимической системы. Результаты измерений показали, что воздействие электромагнитных волн с частотой 3,2 ГГц вызывало гашение люминесценции, и этот эффект не зависел от величины плотности потока падающей мощности в диапазоне от 1,3 до 13 мкВт/см<sup>2</sup>. Источник люминесценции этих бактерий – реакция восстановления флавин-мононуклеотида и липоальдегида молекулярным кислородом. В результате этой реакции формируется долгоживущий комплекс феент–субстрат в возбужденном состоянии, и его релаксация сопровождается световым излучением. Можно предполагать, что гашение люминесценции под действием электромагнитного излучения связано, в первую очередь, с изменениями в клеточных мембранах. Перестройка в липидных фракциях может привести к изменению альдегидного фактора и уменьшить интенсивность люминесценции. В качестве другого канала воздействия можно рассматривать активацию потребления кислорода внутри клетки. Это также приводит к уменьшению уровня люминесценции во время электромагнитного облучения и восстановлению интенсивности люминесценции по окончании облучения. Важная роль молекулярного кислорода в изменениях метаболических процессов под действием электромагнитного излучения отмечалась А.К. Тамбиевым, Н.Н. Кириковой [35], где изучались эффекты электромагнитных волн на цианобактерии *S. Platensis* и другие микроорганизмы.

Механизм воздействия электромагнитного излучения на клетки, основанный на взаимодействии с мембраной, косвенно подтверждается данными, полученными при лечении кардиобольных с помощью миллиметровых волн [36]. В патогенезе этих заболеваний важная роль принадлежит активации перекисного окисления фосфолипидов, содержащихся в клеточных и внутриклеточных мембранах, в частности, в кардиомиоцитах и тромбоцитах. Этот процесс вызывает нарушение функций мембранно-зависимых ферментов, а также изменения структуры и проницаемости мембран.

### **1.7. Модификация митотического цикла**

Изменения метаболических процессов, рассмотренные в предыдущем параграфе, могут быть связаны с митотическим циклом, так как деление клеток требует определенный уровень метаболической активности. Поэтому можно ожидать, что электромагнитное излучение будет влиять на митотический цикл. Согласно экспериментальным данным электромагнитные волны действительно влияют на деление клеток. Эти эффекты носят резонансный характер, то есть электромагнитные волны изменяют скорость митотического деления только на определенных частотах. Изменения могут быть направлены как в сторону стимуляции митоза, так и его подавления, в зависимости от частоты воздействующего излучения. Такие результаты были получены в экспериментах с культурами *E.Coli* и *S.Aureus* [27], а также с фотосинтезирующими микроорганизмами *S.Plantensis* и *P.Vividis* [30]. Облучение лейкоцитарной культуры электромагнитными волнами с длиной волны 7,1 мм приводило к увеличению скорости роста на 50...70 % в первом и втором посевах, в то время как электромагнитное излучение длиной 5,6 мм вызывало увеличение ростовой активности клеток на 52 % только в первом посеве [37].

Стимуляцию пролиферации клеток можно объяснить биохимическими изменениями, обусловленными влиянием электромагнитного излучения. При исследовании эффектов воздействия миллиметровых волн на лимфоциты здоровых людей *in vitro* [38] было найдено, что эти клетки продуцировали цитоплазмальный фактор – цитокин, связанный с активацией дегидрогеназ и действующий как фактор роста.

Электромагнитное излучение может действовать непосредственно на хромосомы, что также может привести к модификации процессов клеточного деления. В работе В.А. Старшиной [39] исследовалось влияние электромагнитного излучения в диапазоне частот 40,75...48,25 ГГц на политенные хромосомы личинок *C. Plumosus*. Было обнаружено, что начальные изменения в хромосомах наступают сразу после облучения длительностью 15 или 30 мин. В обоих случаях генетическая активность непрерывно транскрибируемых сегментов хромосом изменялась одинаковым образом. Наибольшие изменения наступали через 1...2 ч после облучения, что указывает на триггерный механизм действия электромагнитного излучения, которое запускает медленный процесс в клетках. Кроме того, воздействие на определенной частоте вызывает противоположные знаки эффекта в разных сегментах хромосомы: в одних оно стимулирует генетическую активность, в других — подавляет. Вероятно, этот результат в большей степени связан со структурно-функциональной дифференциацией макромолекулярного комплекса (ДНК гистоны, нуклеиновые белки) в различных сегментах хромосом.

Помимо клеточного деления, стимулирующие и ингибирующие частотно-зависимые эффекты электромагнитного излучения наблюдались также в отношении функциональной активности микроорганизмов. К примеру, миллиметровые волны модифицировали фибринолитическую активность *V. Firmus* и синтез пенициллина бактериями *S. Aureus* [40, 41]. Миллиметровые волны изменяют также считывание генетического кода в клетках *E. Coli* [33]. При облучении лизогенных клеток в условиях роста было найдено несколько резонансных частот в диапазоне 69,72 ГГц. При облучении на этих частотах выход фага увеличивался на 5...6 порядков по сравнению с контрольной группой. В исследованиях влияния электромагнитного излучения на индукцию гена  $\beta$ -галакто시다за в культуре CSH 36 было найдено, что относительная ширина резонансной кривой составляет  $\sim 3 \cdot 10^{-3}$ .

## 1.8. Модификация адгезивных свойств клеток

Адгезивные свойства клеток определяются, в первую очередь, состоянием мембран и способностью взаимодействовать с другими телами посредством молекулярных и кулоновских сил. Одним из показателей такой способности является взаимодействие с себе подобными, то есть агрегация клеток. Степень проявления этого свойства, в частности у клеток крови, является очень важной для функционирования организма в нормальном и патологическом состоянии.

Реологические свойства крови у больных с острым инсультом изучались в работе И.А. Подоляко [42]. Результаты этих исследований показывают, что облучение эритроцитов больных *in vitro* электромагнитным излучением с несущей частотой 53,53 ГГц и частотной модуляцией в пределах  $\pm 25$  МГц приводило к уменьшению показателя агрегации на 10 % и увеличению индекса деформации эритроцитов на 20 %. Это можно интерпретировать как уменьшение степени взаимодействия между молекулами на поверхности мембран этих клеток.

Аналогичные измерения на тромбоцитах показали более значительное влияние электромагнитного излучения на агрегацию клеток. В табл. 1.1 приведены индексы спонтанной ( $K_{sp}$ ) и индуцированной агрегации на 2-й, 4-й и 8-й день ( $K_2$ ,  $K_4$  и  $K_8$ ) для этих клеток. Из этой таблицы следует, что отношение показателя индуцированной агрегации в контроле к соответствующему показателю при облучении со временем уменьшается, но в любом случае модификация клеточных мембран под действием электромагнитного излучения остается заметным.

Таблица 1.1

*Влияние электромагнитного излучения на агрегацию клеток*

| Показатель | Эксперимент      | Контроль         | P         |
|------------|------------------|------------------|-----------|
| $K_{sp}$   | $11,96 \pm 0,29$ | $6,09 \pm 0,62$  | $< 0,001$ |
| $K_2$      | $12,42 \pm 1,32$ | $21,44 \pm 1,82$ | $< 0,001$ |
| $K_4$      | $25,55 \pm 2,73$ | $42,62 \pm 3,47$ | $< 0,001$ |
| $K_8$      | $37,82 \pm 3,70$ | $61,54 \pm 4,58$ | $< 0,001$ |

Исследования, проведенные в работе Т.В. Головачева [43], показали, что способность эритроцитов к агрегации изменяется под действием электромагнитного излучения и при облучении *in vivo*. Индекс агрегации эритроцитов с  $(1,23 \pm 0,03)$  до  $(1,08 \pm 0,02)$  о. е. при облучении

кардиобольных электромагнитным излучением с длиной волны 5,6 и 7,1 мм. При этом индекс деформации эритроцитов увеличился с  $(1,06 \pm 0,02)$  до  $(1,20 \pm 0,02)$  о. е. Эти данные подтверждают значительную модификацию поверхностных свойств мембран эритроцитов под влиянием электромагнитного излучения. Рост коагуляционного потенциала крови был обнаружен при лечении простатитов электромагнитным излучением с длиной волны 5,5 мм [44].

Исследования воздействия электромагнитных волн с длиной волны в интервале 5,6...7,1 мм на больных с нарушениями тромбо-васкулярной системы, проведенные в работе Г.Е. Маркова, В.Ф. Киричука [45], показали также изменение способности тромбоцитов к агрегации. Облучение на частотах, подобранных индивидуально для каждого больного, приводило к нормализации функциональных свойств тромбоцитов.

## **1.9. Особенности межклеточной кооперации**

В предыдущем параграфе рассматривалась способность клетки взаимодействовать с себе подобными. Однако состояние мембраны определяет также взаимодействие с клетками и других видов. Это очевидно из результатов экспериментов с микробами коклюша [28]. Такая клетка отличается большой изменчивостью, благодаря чему воздействие электромагнитного излучения может вызвать уменьшение количества или полную потерю некоторых поверхностных антигенов и, соответственно, изменение синтеза антител.

Другой пример модификации степени взаимодействия клеток под действием электромагнитного излучения дают результаты исследования эритроцитов [46]. Свеженабранная кровь с консервантом (цитрат натрия), предотвращающим ее коагуляцию при малых скоростях циркуляции, подвергалась облучению электромагнитными волнами, затем измерялась ее вязкость. Результаты измерений в зависимости от времени экспозиции показаны на рис. 1.5. При малых скоростях циркуляции вязкость крови определяется обратимым связыванием эритроцитов и поэтому зависит от состояния мембран этих клеток. Согласно рис. 1.5 воздействие электромагнитных волн изменяет состояние мембраны, но этот эффект зависит от длительности экспозиции.

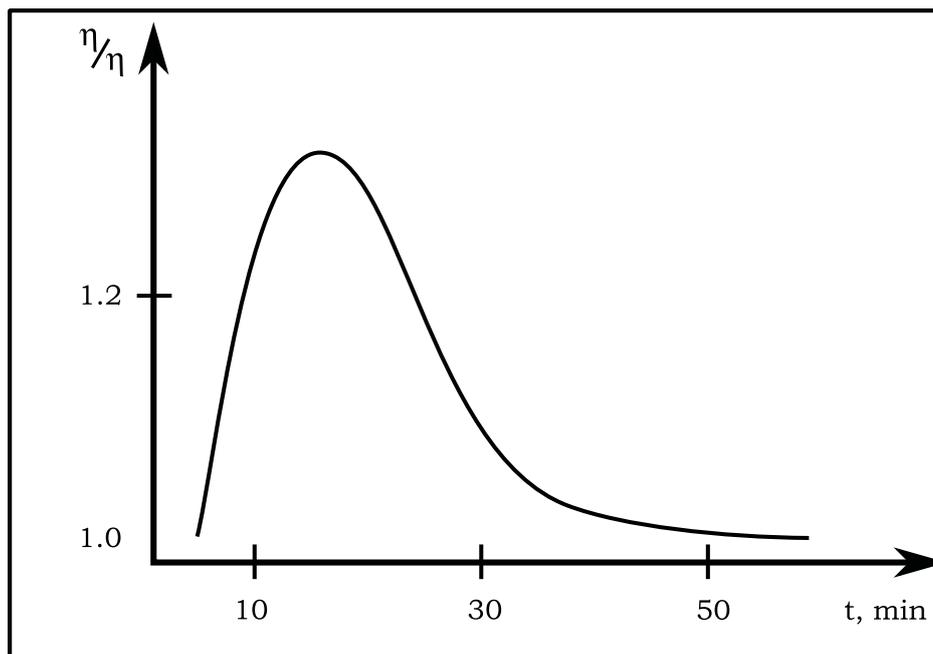


Рис. 1.5. Зависимость вязкости крови от времени экспозиции

Способность эритроцитов к агрегации сильно меняется под действием мощных электромагнитных импульсов наносекундной длительности. В работе Н.Д. Девяткова [47] исследовалось действие таких импульсов ( $\lambda = 3$  см,  $\tau = 10$  нс,  $P_{peak} = 30$  МВт) на эритроциты, у которых предварительно электрическим пробоем были нарушены мембраны. В результате воздействия СВЧ-импульсами мембраны и способность к агрегации восстановились.

В работе В.Ф. Киричука [48] исследовалось влияние миллиметровых волн с частотой 42,2 ГГц на тромбоциты *in vitro*. Было обнаружено, что степень агрегации, ее начальная и максимальная скорости значительно уменьшаются под действием этого воздействия. Представляется, что механизм изменения функциональной активности тромбоцитов включает конформационную модификацию белков на поверхности мембраны под действием электромагнитных волн.

Такая коррекция функциональной активности тромбоцитов важна при лечении различных заболеваний. К примеру, использование облучения кардиобольных электромагнитными волнами с частотой 42,2 ГГц в сочетании с медикаментозным лечением приводило к выраженной нормализации способности тромбоцитов к агрегации [49]. Аналогичный характер изменений функциональной активности тромбоцитов под действием электромагнитного излучения наблюдалось также при облучении на более высоких частотах от 149 до 154 ГГц *in vitro* плазмы крови, обогащенной тромбоцитами [50].

## 1.10. Электромагнитное излучение как индуктор апоптоза

Эффекты, рассмотренные выше, свидетельствуют об изменении функциональной активности клеток под действием электромагнитного излучения. Однако такое воздействие может быть настолько острым, что запускается механизм апоптоза (программируемой смерти) в клетках, облученных электромагнитными волнами. В работе [51] исследовалось действие электромагнитного излучения с частотой 42,2 ГГц и плотностью потока падающей мощности в интервале 0,1...50 мВт/см<sup>2</sup> на структуру кожи. Было найдено, что облучение привело динамическим ультраструктурным изменениям в клетках эпидермиса и дермы. Через 2 ч после облучения в цитоплазме и ядрах этих клеток были обнаружены полости диаметром 0,2...3 мкм. Через 6 ч после облучения эти полости сохранялись. В последующем часть клеток восстановилась, но часть клеток начала деградировать. Через 12 ч после облучения клетки проявляли явные признаки апоптоза – конденсация хроматина, появление больших перинуклеарных промежутков и больших вакуолей в плазме, фрагментация клеток. Детальные исследования показали, что, по крайней мере, часть этих полостей была сформирована в процессе деградации митохондрий.

Проблема апоптоза исследовалась также при низких частотах воздействующего электромагнитного поля. В работе В.Н. Воронкова [52] были проведены эксперименты *in vitro* с двумя линиями трансформированных клеток и одной линией нетрансформированных клеток. Было обнаружено увеличение количества смертей, совпадающих морфологически с апоптозом, исключительно в линиях трансформированных клеток. Индукция смерти клеток наблюдалась в магнитном поле с индукцией более 1 мТ. Этот эффект не зависел от частоты магнитного поля и возрастал, когда использовалась комбинация статического магнитного поля и переменного с частотой 50 Гц.

Противоположные результаты были получены в работе Р. Гомеса [53]. Эффект электромагнитного поля изучался *in vitro* на двух линиях клеток, отличающихся от использовавшихся в работе Р. Гомеса [52]. Клетки экспонировались в электромагнитном поле с частотой 25 Гц и магнитной индукцией 1,5 мТ в течение 2 ч. Никаких значительных изменений в фазах клеточного цикла и никакой индукции апоптоза не было обнаружено. Вероятно, для каждого вида клеток нужна своя частота, запускающая апоптоз. Этот вывод подтверждается результатами работы М. Симко [54], в которой рассматривались эффекты низкоча-

стотного поля. Исследовались две линии клеток: одна — трансформированных, другая — нетрансформированных. Был зафиксирован статистически значимый рост формирования микроядер и индукции апоптоза в трансформированных клетках под воздействием электромагнитного поля с частотой 50 Гц после экспозиции длительностью 48...72 ч. Однако в случае нетрансформированных клеток этот эффект не наблюдался.

### **1.11. Эффекты электромагнитного излучения на клетки злокачественных опухолей**

Индукция апоптоза, рассмотренная в предыдущем параграфе, является важным фактором с точки зрения лечения злокачественных опухолей. В этой связи представляют большой интерес мощные электромагнитные импульсы наносекундной длительности. Использование генераторов таких импульсов в режимах с большой скважностью обеспечивает нетепловой уровень электромагнитного излучения и в то же время позволит создать в биологических тканях поля, сравнимые по напряженности с естественными квазистатическими полями в биологических мембранах  $\sim 10^2 \dots 10^5$  В/см.

В работе М. Симко [54] были проведены эксперименты по воздействию на крыс линии Vistar мощными электромагнитными импульсами. Использовались генераторы, обеспечивающие пиковую мощность 100, 10 и 4 МВт на частотах 10, 20 и 40 ГГц, соответственно. Длительность импульсов составляла 10 нс. Облучение крыс с карциномой Walker 120 импульсами приводило к замедлению скорости роста опухоли в 1,5 раза и увеличению продолжительности жизни на 30 % по сравнению с контролем. Облучение электромагнитными волнами в комбинации с медикаментозным лечением замедляло скорость роста опухоли в 2 раза. Исследование *in vitro* действия такого электромагнитного излучения на клетки опухоли показало разрушение этих клеток.

В работах Н.Д. Девяткова [55–57] также проводились исследования влияния мощных электромагнитных импульсов на опухолевые клетки (карцинома Walker) *in vitro*. Выявлено, что при таком воздействии происходит дистрофическое изменение клеток на стадии лизиса.

Отмечено, что интенсивность электрического поля в клеточных мембранах сильно возрастает в опухолевых клетках на стадии деления. Пролиферация в опухолевых клетках происходит иначе, чем в нормальных, поэтому электромагнитное излучение может изменить метаболизм опухолевых клеток.

## 1.12. Заключение

Таким образом, электромагнитное излучение оказывает воздействие на биологические объекты даже при очень низкой интенсивности, и диапазон эффективных частот очень широк. Наиболее важные с точки зрения биологии и медицины эффекты электромагнитного излучения на молекулярном и клеточном уровнях приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

*Эффекты электромагнитного излучения на молекулярном и клеточном уровнях*

| Объект воздействия | Диапазон частот             | Последствия воздействия электромагнитного излучения  |
|--------------------|-----------------------------|--|
| Биомакромолекулы   | 1...150 ГГц                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Конформационные переходы в белковых молекулах.</li> <li>2. Изменение функциональной активности:               <ol style="list-style-type: none"> <li>а) ферментов;</li> <li>б) транспортных белков;</li> <li>в) ионных каналов.</li> </ol> </li> <li>3. Разрыв цепей ДНК.</li> <li>4. Изменение третичной структуры хромосом.</li> <li>5. Модификация транскрибирования генетической информации</li> </ol> |
| Мембраны           | 1...150 ГГц                 | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изменение распределения зарядов на поверхности мембран.</li> <li>2. Модуляция устойчивости к внешним факторам.</li> <li>3. Изменение сродства к биомолекулам.</li> <li>4. Изменение проницаемости для ионов и биомолекул</li> </ol>  |
| Клетки             | 0,1...2·10 <sup>11</sup> Гц | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Изменение метаболизма.</li> <li>2. Модуляция роста и деления.</li> <li>3. Модификация функциональной активности.</li> <li>4. Инициация апоптоза</li> </ol>   |

### Список литературы к главе

1. Карнаухов А.В., Пономарев В.О. Диссипативный резонанс — новый класс физических явлений. Некоторые подходы к аналитическому описанию // Биомедицинские технологии и электроника. — 2001. — № 8. — С. 23–31.
2. Особенности воздействия ЭМИ на биомолекулы / А.Р. Каримов [и др.] // Комбинационное рассеяние — 70 лет исследований. — М., 1998. — С. 243–249.
3. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на быструю динамику молекулы гемоглобина / В.В. Горбунов [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». — М., 1989. — С. 74.
4. О кооперативных (когерентных) явлениях в биологических явлениях (концепция «когерентного возбуждения» и «белок-машина») / Д.С. Чернавский [и др.]. — Препринт ФИАН. — 1986. — № 185.
5. Бетский О.В., Яременко Ю.Г. Кожа и электромагнитные волны // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1998. — № 1(11). — С. 3–15.
6. Исследование многорезонансного взаимодействия электромагнитных колебаний с молекулой гемоглобина с помощью мессбауэровской спектроскопии / Н.П. Диденко [и др.] // Труды НИИ ядерной физики. — Томск, 1983. — № 10. — С. 77–81.
7. Роль индуцированных конформационных переходов в механизме резонансного взаимодействия миллиметровых волн с биомолекулами / Н.П. Диденко [и др.] // Письма в ЖТФ. — 1987. — Т. 14. — С. 842–846.
8. Изменения динамики белков под влиянием электромагнитных осцилляций нетеплового уровня / Н.П. Диденко [и др.] // Письма в ЖТФ. — 1985. — Т. 11. — С. 1515–1520.
9. Конформационные медленнорелаксирующие флуктуации в молекулах белка / Н.Д. Девятков [и др.] // Доклады АН СССР. — 1987. — Т. 293. — № 2. — С. 469–472.
10. Аномальная температурная зависимость квадрупольного расщепления метгемоглобина / Н.П. Диденко [и др.] // Письма в ЖТФ. — 1983. — Т. 9. — № 6. — С. 332–335.
11. Воздействие физических факторов на плазму крови / Л.В. Калюжная [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. — М., 1989. — С. 54.

12. Ченская Т.В., Петров И.Я. Исследование влияния электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на компоненты мембраны с помощью ИК-спектроскопии // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 77.
13. Влияние электромагнитного излучения на аффинность гемоглютинирующих иммуноглобулинов / Н.П. Диденко [и др.] // НИИЯФ ТПУ. – Томск, 1984. – 10 с. – Деп. в ВИНТИ 17.05.84, № 3178-84.
14. Влияние электромагнитного излучения на резистентность мембран эритроцитов, перекисное окисление липидов и активность ферментов плазмы крови / А.С. Корягин [и др.]. // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2000 – № 2 (18). – С. 8–10.
15. Перекисное окисление и фактор охлаждения / В.Ю. Куликов [и др.] – Новосибирск: Наука, 1988.
16. Фершки Е. Структура и механизмы действия ферментов. – М.: Мир, 1980.
17. Кужманова М., Иванов С. Воздействие миллиметровых волн и g-излучения на поверхностный электрический заряд мембран эритроцитов // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 105–107.
18. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на электрофоретическую подвижность эритроцитов / В.Н. Крылов [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2000. – № 2 (18). – С. 5–7.
19. Влияние электромагнитного излучения на рост иммунного статуса культуральной среды *S. Platensis* / А.Х. Тамбиев [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 8. – С. 23–28.
20. Действие низкоэнергетичных СВЧ-импульсов наносекундной длительности большой пиковой мощности с различной длиной волны на ионный транспорт, проницаемость клеточных мембран, процессы регенерации клеток и развитие злокачественных опухолей / Н.Д. Девятков [и др.] // Доклады XII Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 30 октября–1 ноября 2000 г. – М., 2000. – С. 84–86.
21. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на быстрый калиевый ток в нейронах моллюска / С.И. Алексеев [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 78.

22. Изучение влияния миллиметровых волн на кустиковидные рецепторы / А.Ю. Сазонов [и др.] // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 105–107.
23. Желтов Н.Г. Изучение влияния электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на электрофизиологическую активность механорецепторов кожи лягушки // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 80.
24. Сазонов А.Ю., Рыжкова Л.В. Влияние миллиметровых волн на биологические объекты различной степени сложности // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 112–114.
25. Бурачас Г. Подавление потенциала действия в нерве миллиметровыми волнами // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989. – М., 1989. – С. 80.
26. Гапонюк Ю. Роль рефлекторных механизмов при влиянии электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на человеческий организм // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989. – М., 1989. – С. 23.
27. Действие миллиметровых волн на бактерии в экспериментах *in vitro* и *in vivo* / Г.М. Шаб [и др.] // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в биологии и медицине». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 95–97.
28. Исследования влияния электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на иммуногенетические особенности возбудителя коклюша / И.А. Алексеева [и др.] // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 97–98.
29. Холодная Л.С. Влияние миллиметровых волн на иммунобиологические особенности условно патогенных бактерий // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 100.
30. Тамбиев А.К., Курикова Н.Н. Основные закономерности действия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на фотинтегрирующие объекты // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995. – М., 1995. – С. 100–102.

31. Влияние когерентного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона нетепловой интенсивности на скорость роста *Bacillus subtilis* / А.Ю. Криницкая [и др.] // Биомедицинская электроника. — 2001. — № 2. — С. 49–53.
32. Влияние миллиметровых волн низкой интенсивности на рост и развитие культуры простейших / М.З. Левина [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низко-интенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. — М., 1989. — С. 82.
33. Селективная индукция репрессированного оперона в геноме *Escherichia coli* / В.А. Гусев [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низко-интенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. — М., 1989. — С. 81.
34. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на биолюминесценцию бактерий / Л.Ю. Бержанская [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1993. — № 2. — С. 63–67.
35. Tambiev A.K., Kirikova N.N. Effect of millimeter radiation on metabolism of cyanobacteria *Spirulina platensis* and other photosynthesizing organisms // Crit. Rev Biomed. Eng. — 2000. — V. 28 (3-4). — P. 589–602.
36. Динамика процессов перекисного окисления липидов пациентов с нестабильной кардионевралгией при миллиметровой терапии / А.Ю. Лебедева [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1995. — С. 18–20.
37. Влияние миллиметровых волн на функциональную активность человеческих лейкоцитов (in vitro) / В.А. Старшина [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения в биологии и медицине». Москва, 1989 г. — М., 1989. — 34 с.
38. Продукция фактора роста клеточной пролиферации лимфоцитами и фибробластами при облучении электромагнитными волнами / В.И. Говалло [и др.] // Доклады на Международном симпозиуме «Миллиметровые волны нетепловой интенсивности в медицине». — М., ИРЭ АН СССР, 1991. — Ч. 2. — С. 340–344.
39. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на политенные хромосомы *Chironomus plumosus* / Г.Г. Брилл [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 2000. — № 1(17). — С. 3–7.
40. Реброва Т.В. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на жизненные функции микроорганизмов // Миллиметровые волны в биологии и медицине. — 1992. — № 1. — С. 37–47.

41. Garaj-Vrhovac V. Micronucleus assay and lymphocyte mitotic activity in risk assessment of occupational exposure to microwave radiation // *Chemosphere*. – 1999. – V. 39 (13). – P. 2301–2312.
42. Изменение *in vitro* реологических свойств крови под действием миллиметровых волн у пациентов в острый период инсульта / И.А. Подольяко [и др.] // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2000. – № 4 (20). – С. 53–55.
43. Электромагнитное излучение миллиметрового диапазона как патогенная терапия при заболеваниях сердечно-сосудистой системы / Т.В. Головачева [и др.] // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2000. – № 1 (17). – С. 18–25.
44. Суворов С.А., Киричук В.Ф. Коррекция нарушений гемостатической системы у больных простатитом с использованием электромагнитного излучения миллиметрового диапазона // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2000. – № 1(17). – С. 39–46.
45. Киричук В.Ф. Маркова Г.Е. Состояние васкулярно-тромбоцитарного звена гемостатической системы и его коррекция с помощью миллиметровых волн // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2000. – № 1 (17). – С. 8–17.
46. Фактор разделения при воздействии миллиметрового излучения на живые клетки / А.П. Кузнецов [и др.] // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 102–105.
47. Воздействие низкоэнергетического импульсного СВЧ-излучения наносекундной длительности с большой пиковой мощностью и низкой интенсивностью излучения миллиметрового диапазона на ионный транспорт, проницаемость клеточных мембран, процессы регенерации клеток и развитие злокачественных опухолей / Н.Д. Девятков [и др.] // Доклады XII Всесоюзного симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 30 октября–1 ноября 2000 г. – М., 2000. – С. 84–86.
48. Характеристики изменений функциональной активности тромбоцитов миллиметрового диапазона у больных нестабильной кардионевралгией под влиянием электромагнитных излучений *in vitro* / В.Ф. Киричук [и др.] // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2001. – № 1–2 (21–22). – С. 11–21.
49. Киричук В.Ф., Волин М.В. Изменения функциональной активности тромбоцитов при использовании миллиметровой терапии в комплексном лечении больных нестабильной кардионевралгией // *Миллиметровые волны в биологии и медицине*. – 2001. – № 1–2 (21–22). – С. 11–21.

50. Влияние электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона на частотах молекулярного спектра поглощения и излучения оксида азота на тромбоциты как эффекторные клетки гемостатической системы / В.Ф. Киричук [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 1–2 (21–22). – С. 3–10.
51. Ультраструктурные изменения в коже мышей, вызванные электромагнитными излучениями миллиметрового диапазона / В.Н. Воронков [и др.] // Доклады XI Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 2–12 апреля 1997 г. – М., 1997. – С. 117–118.
52. Static and ELF magnetic fields induce tumor growth inhibition and apoptosis / S. Tofani [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2001. – V. 22(6). – P. 419–428.
53. 25 Hz electromagnetic field exposure has no effect on cell cycle distribution and apoptosis in U-937 and HCA-2/1cch cells / Ruiz Gomez M.J. [et al.] // Bioelectrochemistry. – 2001. – V. 53(1). – P. 37–40.
54. Effects of 50 Hz EMF exposure on micronucleus formation and apoptosis in transformed and nontransformed human cell lines / M. Simko [et al.] // Bioelectromagnetics. – 1998. – V. 19(2). – P. 85–91.
55. Воздействие низкоэнергетических СВЧ-импульсов наносекундной длительности с большой пиковой мощностью и миллиметрового излучения на биологические структуры (злокачественные опухоли) / Н.Д. Девятков [и др.] // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 115.
56. Influence of low-energetic pulse microwave and millimeter radiation of nanosecond duration with large peak power on biological structures (malignant tumors) / N.D. Devjatkov [et al.] // Biomedical electronics. – 1998. – № 1. – P. 56–62.
57. Воздействие низкоэнергетического СВЧ-излучения наносекундной длительности с большой пиковой мощностью и низко-интенсивного миллиметрового излучения на злокачественные опухоли в эксперименте / Н.Д. Девятков [и др.] // Доклады XII Всесоюзного симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 30 октября–1 ноября 2000 г. – М., 2000. – С. 87–90.

## **2. ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ В ЦЕЛОМ**

В предыдущей главе были рассмотрены эффекты электромагнитного излучения на биообъекты микроскопического уровня, а именно на биомолекулы и клетки. Очевидно, что модификация свойств и активности микроскопических биологических структур под действием электромагнитных волн ведет к изменению свойств биологических тканей и функциональных систем организма. В этой главе мы рассмотрим проявление таких изменений локального и общего характера. В § 2.1 приведены данные о локальных изменениях, касающиеся функциональных и морфологических особенностей биологических тканей. Общие изменения в организме под воздействием электромагнитного излучения рассмотрены в следующих параграфах. Темой § 2.2 являются особенности откликов нервной и эндокринной систем организма. Стрессорный и адаптогенный эффекты электромагнитных волн рассмотрены в § 2.3. Параграф 2.4 посвящен рассмотрению влияния электромагнитного излучения на поведение животных. Изменения в поведении оператора в условиях облучения электромагнитным излучением рассмотрены в § 2.5. Возможности целенаправленной коррекции статуса физиологических систем организма показаны в § 2.6. Наконец, § 2.7 посвящен изложению данных относительно зависимости локальных и общих эффектов от параметров облучения, в частности, мощности и частоты электромагнитного излучения, продолжительности экспозиции, режима облучения.

## 2.1. Функциональная и морфологическая модификация биологических тканей под действием электромагнитного излучения

Изменения, возникающие в биологических тканях под действием электромагнитного излучения нетепловой интенсивности, представляют большой интерес с точки зрения определения патогенного влияния электромагнитных волн и их применения в лечебных целях. Эти изменения, естественно, являются следствием модификации биологических процессов под воздействием электромагнитного излучения, но опубликованные данные, как правило, носят феноменологический характер и не содержат анализа механизмов генерации этих изменений. В работе В.М. Перельмутера[1] исследовалось влияние миллиметровых волн нетепловой интенсивности на кожу мышей. При облучении левого бедра общий эффект проявлялся в увеличении кровенаполнения сосудов в коже левого и правого бедер и уменьшении количества тучных клеток (относящихся к классу иммунокомпетентных клеток), но только в необлученной коже. Локальный эффект электромагнитного излучения состоял в повышении количества тучных клеток и лимфоцитов в зоне облучения. При облучении правого бедра локальный эффект заключался в уменьшении содержания крови в сосудах этой конечности.

Часть работ было посвящена исследованию влияния электромагнитного излучения на процессы регенерации тканей, в которых изучалось лечение ран экспериментальных животных. Участки с круговыми ранами на всю глубину кожи мышей облучались электромагнитными волнами с частотами 53,53 и 42,96 ГГц в течение 5 дней после операции. Информацию о степени формирования грануляционной ткани получали путем измерения концентрации гликопротеинов. Результаты измерений приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

*Влияние электромагнитного излучения на степень формирования грануляционной ткани*

|                     | Контроль        | Частота электромагнитного излучения |                                 |                                 |
|---------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
|                     |                 | 53,53 ГГц                           | 42,96 ГГц                       | 42,96 ГГц                       |
|                     |                 | Без модуляции                       | Без модуляции                   | Модуляция $\pm 200$ МГц         |
| Гидроксипролин (ГП) | $100 \pm 0,52$  | $81,15 \pm 2,72$<br>$P < 0,01$      | $82,12 \pm 2,72$<br>$P < 0,01$  | $129 \pm 2,67$<br>$P < 0,01$    |
| Гидроксизин (ГЛ)    | $100 \pm 0,04$  | $91,95 \pm 7,00$<br>$P > 0,05$      | $103,78 \pm 2,23$<br>$P > 0,05$ | $155,17 \pm 2,37$<br>$P < 0,05$ |
| ГЛ/ГП               | $0,46 \pm 0,03$ | $0,51 \pm 0,03$<br>$P > 0,05$       | $0,61 \pm 0,02$<br>$P < 0,05$   | $0,55 \pm 0,21$<br>$P < 0,05$   |

Согласно табл. 2.1 облучение электромагнитными волнами без модуляции несущей частоты значительно уменьшает создание гликопротеинов. Нужно отметить, что эти белки являются главными компонентами в воспалительной лимфе, которая считается необходимым участником процесса лечения ран. Поэтому уменьшение их содержания под действием электромагнитного излучения можно интерпретировать как подавление функции воспаления. Увеличение содержания коллагена, оцененного по концентрации гидроксипролина, свидетельствует об оптимизации формирования рубца.

Поскольку грануляционная ткань формируется главным образом внеклеточным путем, можно предположить, что электромагнитное излучение на фиксированных частотах 53,53 и 42,96 ГГц подавляет синтез внеклеточных белков, но не влияет на коллагеновые структуры, что подтверждается фактом поддержания отношения концентраций ГЛ/ГП. Воздействие электромагнитного излучения с модуляцией несущей частоты приводит к активации синтеза белков. Концентрация коллагеновых белков, оцененная по содержанию тирозина, оставалась практически неизменной во всех экспериментах.

Миллиметровые волны оказывают стимулирующее действие на регенерацию нервных волокон. Так, кожу бедра крысы в районе шва облучалась электромагнитными волнами с частотой 53,57 ГГц и плотностью потока падающей мощности  $4 \text{ мВт/см}^2$ . Измерения потенциала действия через 5 мес. после операции показали стимулирующий эффект электромагнитного излучения в отношении реабилитации нерва, что проявилось в увеличении скорости передачи потенциала действия на 30 % по сравнению с контролем.

Для понимания механизма отклика биологических тканей на воздействие электромагнитного излучения важны исследования на изолированных препаратах тканей. В работе В.Н. Крылова, И.В. Ошевенского [2] электромагнитными волнами облучалась мышечная ткань в частотном диапазоне 53...78 ГГц со спектральной плотностью  $4 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/Гц}$  при интегральной мощности 1,5 мВт. Собственная тоническая активность ткани (тонус, частота и амплитуда) не изменялась при таком воздействии. Реакция на парасимпатический медиатор (ацетилхолин) также была неизменной, но интенсивность реакции на симпатический медиатор (норадреналин) была в 2 раза больше. Можно предположить, что электромагнитное излучение увеличивает медиаторную чувствительность адренэргетических рецепторов мембран клеток ткани гладкой мускулатуры кишечника, и это может осуществляться как в отношении

$\alpha$ -, так и  $\beta$ -адренорецепторов. Реакция первых ( $\alpha$ -) может быть связана с увеличением трансмембранного калиевого тока и, соответственно, подавлением собственной миогенной активности, а вторых ( $\beta$ -) – с уменьшением кальциевого тока и, следовательно, подавлением конъюгации между стимуляцией и сокращением мышечных клеток.

Облучение кератоцитов, которые являются главной компонентой человеческой кожи, электромагнитным излучением с частотой 61,22 ГГц показало, что такое воздействие вызывает небольшое, но статистически значимое увеличение межклеточного содержания интерлейцина  $1\beta$ . В то же время это воздействие не изменяло пролиферацию и хемотаксис клеток и не влияло на адгезивные свойства кератоцитов. Эти данные показывают, что облучение человеческой кожи может активировать базальные кератоциты, обеспечивая стимуляцию синтеза интерлейцина  $1\beta$ .

Облучение электромагнитными волнами нервных тканей может приводить к морфологическим изменениям. Деструкция цитоплазмы миелинизированных и немиелинизированных нервных волокон была обнаружена сразу после 15-минутного облучения электромагнитными волнами частотой 42,25 ГГц.

## **2.2. Особенности изменений нервной и эндокринной систем организма под действием электромагнитных волн**

Отклики нервной системы на воздействие электромагнитного излучения носят весьма разнообразный характер, в зависимости от условий облучения и состояния объекта воздействия. Поэтому учет всех деталей облучения очень важен для установления общих закономерностей отклика нервной системы на воздействие электромагнитного излучения. Один из методов оценки функционального состояния вегетативной нервной системы заключается в спектральном анализе сердечных ритмов. Вегетативные эффекты формируют три компоненты сердечных ритмов: низкочастотную (менее 0,05 Гц), среднечастотную (0,08...0,12 Гц) и высокочастотную (0,15...0,5 Гц). Первая из них связана с метаболической системой регуляции, вторая – с барорефлектор-

ной и третья – с респираторной. Влияние электромагнитного излучения изучалось на практически здоровых людях в возрасте от 20 до 30 лет. Облучалась тыльная сторона кисти руки электромагнитным излучением с плотностью потока падающей мощности 5 мВт/см<sup>2</sup>. Результаты исследований показали сильный отклик на среднечастотной компоненте сердечного ритма. Амплитуда этой компоненты возросла в 1,5 раза, в то время как ложное воздействие (плацебо) несколько уменьшало ее (до 94 %). Поэтому можно полагать, что основные изменения в вегетативной нервной системе связаны с сосудистой системой.

Исследования отклика центральной нервной системы на воздействие электромагнитного излучения проводятся, как правило, используя электроэнцефалограмму (ЭЭГ). Можно выделить по результатам исследований следующие принципиальные особенности ЭЭГ – реакции на электромагнитное облучение:

- 1) увеличение количества веретенообразных осцилляций и медленных волн (синхронизация);
- 2) изменения в ЭЭГ появляются как отклик на включение или выключение электромагнитного воздействия с временным шагом 10...20 с (неспецифический отклик);
- 3) изменения ЭЭГ сопровождаются изменениями биопотенциалов подкорковых структур, в частности гиппокампа, гипоталамуса, специфических и неспецифических ядер таламуса и ретикулярных ядер среднего мозга. Это показывает, что при кратковременном воздействии электромагнитных волн изменения суммарных и импульсных биопотенциалов коры полушарий являются эффектом прямого действия проникающих факторов на мозг.

Нужно отметить, что ЭЭГ-реакции на воздействие электромагнитного излучения зависят от эмоционального состояния человека. При лечении больных с гастродуоденальной язвой с использованием электромагнитных волн [3] было обнаружено, что развивается реакция десинхронизации  $\alpha$ -ритма ЭЭГ. Эта реакция наступала особенно часто при воздействии частотами 58,0...59,5 и 61,5 ГГц. А.П. Алистов [3] полагает, что реакция стимуляции фоновой активности в миллиметровой терапии имеет неспецифический характер и может отражать увеличение чувствительности у пациента при наблюдении. Реакция инактивации фоновой активности отражает тот факт, что пациент переходит в эмоциональное состояние комфорта, сонливости. Это совпадает с релаксацией клинических показателей язвенной болезни.

При лечении больных с гипертензией зарегистрировано повышение частоты повторения потенциалов действия афферентных волокон срединного нерва левой руки при облучении участка кожи около точки акупунктуры 9.9 канала перикарда в течение 1 мин. Частота электромагнитного излучения изменялась от 53,596 до 53,603 ГГц с частотой модуляции 0,05 Гц при плотности потока падающей мощности менее 5 мВт/см<sup>2</sup>. Анализ ЭЭГ показал увеличение интенсивности спектральной компоненты в диапазоне  $\alpha$ -ритма по сравнению с фоновой величиной у 18 из 20 пациентов. При новокаиновой блокаде срединного нерва облучение электромагнитным излучением приводило к изменениям параметров фоновой импульсной активности и спектральных характеристик ЭЭГ.

Обобщение результатов исследований сенсорных реакций на электромагнитное воздействие позволяет сделать следующие выводы [4]:

- человек способен отличить электромагнитное воздействие от ложного воздействия (плацебо);
- чувствительность человека к электромагнитным волнам зависит как от особенностей самого человека, так и от параметров излучения;
- тип возникающих ощущений (сдавливание, касание, покалывание, жжение) свидетельствует об участии кожных рецепторов в отклике на воздействие электромагнитных волн;
- латентный период сенсорных реакций на воздействие электромагнитных волн может достигать 15 мин;
- сенсорная асимметрия при восприятии электромагнитных волн (реакция зависит от того, какая рука экспонировалась излучению) имеет место.

Исходя из этих наблюдений, можно предполагать, что воздействие электромагнитных волн может запустить генерирование сигналов механорецепторами (тактильная чувствительность) или болевыми рецепторами (ноцицепторами), поскольку развитие реакции достаточно медленное (вплоть до 15 мин). Можно выделить наиболее медленные из всех механорецепторов как возможных «приемников» электромагнитных волн. Это тактильные диски, диски Меркеля и нервные окончания Руффини. Роль сенсорных «приемников» электромагнитного излучения может также выполняться болевыми рецепторами, которыми являются свободные нервные окончания с тонкими миелинизированными и немиелинизированными нервными волокнами. Помимо типа ощущений (покалывание или жжение) это предположение подтверждается фактом исчезновения электромагнитной чувствительности

при обработке участка кожи, экспонированного излучению, хлорэтилом, отключающим болевые рецепторы.

Кроме этого, электромагнитное излучение может вызвать эпилептоморфную активность, проявляющуюся в возникновении низкочастотных (2...4 Гц) высокоамплитудных (более 300 мкВ) пиков в ЭЭГ [5]. Возможность появления такой активности в результате действия электромагнитного излучения в определенных условиях (при введении амиазины) была отмечена в работе А.В. Сидоренко, В.В. Царюк [6], посвященной исследованию влияния непрерывного и импульсного электромагнитного излучения с несущей частотой 42,2 ГГц на мозг животных при различных функциональных состояниях центральной нервной системы. Различие в функциональном состоянии отражалось в реакции ЭЭГ. Активные животные демонстрировали реакцию синхронизации при воздействии электромагнитного излучения, в то время как у наркотизированных животных наблюдалась ЭЭГ с усилением  $\alpha$ - и  $\beta$ -ритмов и показателями увеличения динамических характеристик центральной нервной системы.

Реакция нервной системы на воздействие электромагнитного излучения сопровождается эндокринными изменениями. Исследовалось влияние электромагнитных волн на концентрацию серотонина и катехоламинов в лимфатических узлах крыс. Уже через 15 мин после электромагнитного воздействия концентрация этих веществ резко увеличилась в лимфатических узлах. Помимо этого отмечалось также увеличение количества интрафолликулярных люминесцентных клеток.

Изучался эффект электромагнитного излучения на симпатoadреналовую систему человека. Электромагнитные волны имели длину волны 5,6 и 7,1 мм и плотность потока падающей мощности около 10 мВт/см<sup>2</sup>. Экспонировался участок большого бугра на затылке у практически здоровых людей и больных с нарушениями симпатoadреналовой системы. Данные, полученные в этой работе, позволяют утверждать, что

- электромагнитные волны действуют на симпатoadреналовую систему, изменяя метаболизм катехоламинов и других медиаторов;
- это действие имеет адаптивный характер, так как симпатoadреналовая система реагирует адекватно:
  - а) при изначально низком уровне выделения катехоламинов под воздействием электромагнитных волн наблюдалось увеличение выделения дофамина на 65 %, норадреналина – на 140 % и адреналина – на 80 %;

- б) при изначально нормальном и высоком уровнях выделения катехоламинов реакция системы на воздействие электромагнитных волн отличается уменьшением уровня для дофамина на 70 %, увеличением для норадреналина на 90 % и адреналина на 4 %.

Таким образом, воздействие электромагнитного излучения с длиной волны 5,6 и 7,1 мм может приводить к коррекции метаболизма катехоламинов, которые являются интегрирующим звеном симпатoadrenalной системы, и изменения состояния этой системы носят адаптивный характер.

### **2.3. Характеристики стрессорного и адаптогенного эффектов электромагнитных волн**

Ю.А. Холодов [7] было предположил, что реакция нервной системы на воздействие электромагнитного излучения обусловлена начальной реакцией мозга. Эта реакция предшествует стрессу и при кратковременном воздействии вызывает антистрессорный эффект, и увеличивает резистентность организма. Биохимические исследования антистрессорных эффектов миллиметрового излучения были выполнены на нелинейных белых крысах. Результаты показали, что коррекция последствий стресса зависит от начального состояния организма. Для «бодрых» животных стресс приводит к уменьшению уровня серотонина в микрофагах субкапсулярной зоны тимуса, и после электромагнитного воздействия этот уровень восстанавливается до нормы. Уровень серотонина в лимфоцитах мозга увеличивался после стресса и уменьшался после последующей экспозиции электромагнитными волнами. В лимфоцитах коры стресс уменьшал уровень катехоламинов, а облучение миллиметровыми волнами восстанавливал его.

Отличающиеся от этого результаты были зарегистрированы для «сонных» животных. Стресс приводил к изменению уровня моноаминов в направлении, противоположном относительно наблюдаемого для «бодрых» животных. В данном случае уровень серотонина увеличивался в субкапсулярных микрофагах и уменьшался в лимфоцитах мозга, а уровень катехоламина в лимфоцитах коры повышался. Воздействие

электромагнитного излучения не приводило к коррекции моноамидных изменений. Более того, оно увеличивало уровень серотонина в микрофагах. Таким образом, электромагнитное излучение действует односторонне в отношении биохимических изменений. И его использование оправдано, если реакция на стресс нуждается в коррекции именно в этом направлении.

В работе Н.А. Темурьянова [8] исследовался антистрессорный эффект миллиметрового излучения с длиной волны 5,6 мм и плотностью потока падающей мощности 10 мВт/см<sup>2</sup> в условиях реакции белых крыс на гипокинезию. Для оценки антистрессорного действия электромагнитных волн производились измерения цитохимического статуса нейтрофилов (содержание пероксидазы и липидов) и лимфоцитов (содержание сукцинат- и  $\alpha$ -глицерофосфатдегидрогеназы) периферической крови. Такие измерения дают информацию об изменениях неспецифической резистивности.

Результаты измерений показали, что антистрессорный эффект зависит от типологического статуса животных и зоны облучения. Для животных с низкой и средней подвижностью антистрессорный эффект получался при облучении затылка и внешней стороны правого бедра, но не наблюдался отклик при облучении левого бедра. Антистрессорный эффект проявлялся в увеличении цитохимических показателей липидов и активности дегидрогеназ в лимфоцитах. Оценки эффективности адаптации по морфологическому составу крови показали, что отклик животных на электромагнитное воздействие являлся реакцией тренировки. Для животных с высокой подвижностью антистрессорный эффект получался при облучении затылка и левого бедра, в то время как экспозиция правого бедра не приводила к ограничению стрессорной реакции.

Описание асимметрии антистрессорных эффектов электромагнитного излучения была обнаружена также в работе В.М. Перельмутера [9]. Гипокинетический стресс вызывался помещением мышей в камеры для облучения. Использовались два типа камер: первый был предназначен для облучения правого бедра и имел соответствующее отверстие с правой стороны, а второй — отверстие с левой стороны. «Правосторонняя» камера вызывала кратковременную лимфопению и уменьшение числа тимоцитов в левом тимусе. При облучении правого бедра была зафиксирована выраженная лимфопения через 1 ч после облучения, которая затем исчезала в течение последующих 24 ч. Кроме этого, было зарегистрировано увеличение числа тимоцитов в правом

тимусе. Облучение левого бедра приводило только к кратковременной лимфопении в первые минуты после облучения.

В продолжение этой работы исследовалась зависимость антистрессорного эффекта электромагнитного воздействия от длины волны излучения и длительности экспозиции [10]. Было найдено, что воздействие на длине волны 5,6 мм более эффективно, чем на длине волны 7,1 мм. В последнем случае воздействие электромагнитных волн ограничивало развитие стресса, но не повышало уровень функциональной активности клеток крови. Антистрессорное действие электромагнитного излучения с длиной волны 5,6 мм зависело от длительности экспозиции. Положительные результаты фиксировались уже при 15-минутной экспозиции. Эффект становился более выраженным при 30-минутной длительности облучения, но 60-минутное воздействие оказалось менее эффективным, чем экспозиции с длительностью 15 и 30 мин.

Следует отметить, что антистрессорный эффект под воздействием излучения с длиной волны 5,6 мм наблюдался не для всех стрессорных условий. В работе А.Ю. Арзуманова [11] исследовалась зависимость антистрессорного эффекта от степени развития стресса. Результаты показали, что в условиях сильного стресса животных (иммобилизация, включая фиксирование головы) заметного антистрессорного эффекта не наблюдалось. В этом случае все поведенческие реакции (питание, секс, тесты «открытое поле», «вынужденное плавание») подавлялись стрессом.

В условиях менее жесткого стресса, а именно кинетических ограничений, антистрессорное действие электромагнитного излучения проявлялось более выражено в случаях, когда животное находилось в ситуациях, угрожающих их жизни. Одна из таких ситуаций используется в тесте Фогеля, в котором поведение животных оценивается по количеству попыток получить питье, во время которых они получают электрический удар. В то же время стрессорный эффект сильнее проявлялся в поведенческих реакциях животных на положительный биологический стимулятор.

В работе Н.Н. Лебедевой, О.П. Сулимовой [12] исследовалось влияние электромагнитного излучения с длиной волны 7,1 мм на сердечный ритм и ЭЭГ в условиях психологического стресса, вызываемого экспериментальной процедурой. Данные, полученные на 5 добровольцах, показали возможность развития стрессовой реакции. Это подтверждается результатами электромагнитного лечения 52 больных, разделенных на группы в зависимости от степени ожога, оцененной по индексу Франка. Интенсивность стрессорной реакции определялась по

количеству лимфоцитов в крови. Облучение больных приводило к увеличению количества лимфоцитов по сравнению с соответствующей контрольной группой. Антистрессорный эффект не зависел от площади и глубины ожога в пределах от нескольких до 50 единиц индекса Франка, а также от степени изначального стресса, обусловленного ожогом.

Помимо феноменологических исследований большой интерес представляют работы, посвященные изучению механизмов антистрессорного эффекта. В одной из таких работ рассматривалась роль перекисного окисления липидов и тиосульфидного обмена в ограничении стрессовой реакции [13]. Выбор этих биохимических процессов был обусловлен тем, что они играют важную роль в регуляции процессов подавления и активации центральной нервной системы. Перекисное окисление зависит от многих факторов, в частности от состава липидов мембран, активности белков и не-белков в про- и антиоксидантных системах. Активность этих систем контролируется нейрогуморальными механизмами. Одним из наиболее важных элементов физиологической антиоксидантной системы является тиосульфидный обмен.

Результаты исследования процесса перекисного окисления липидов в мышцах в случае гипокинетического стресса при облучении электромагнитными волнами с длиной волны 7,1 мм показали, что такое электромагнитное воздействие модифицирует этот процесс, и направление изменений противоположно действию стресса. Если гипокинетический стресс приводил к сильному увеличению продуктов перекисного окисления в таламусе и гипоталамусе, то электромагнитное воздействие вызывало изменение содержания этих продуктов в направлении нормализации.

## **2.4. Влияние электромагнитного излучения на поведение животных**

Экспериментальные исследования эффектов электромагнитных волн на поведение животных чаще всего выполняются на крысах и приматах. Исследовалось влияние на крыс электромагнитного поля, созданного ультраширокополосными (УШП) импульсами. Целью исследований было определение тератологических и поведенческих изменений при воздействии в следующих режимах:

- 1) каждодневная экспозиция УШП импульсам в период беременности в течение 3...18 дней;
- 2) экспозиция в течение 10 дней после рождения.

Облучение выполнялось импульсами со следующими параметрами: напряженность электрической компоненты — 55 кВ/м, длительность переднего фронта — 0,3 нс, длительность импульса — 1,8 нс. Результаты экспериментов не показали изменений поведения животных при воздействии УШП импульсов за тем лишь исключением, что крысы в сеансе облучения издавали больше шума, чем в контроле.

Использовались УШП импульсы с параметрами: длительность импульсов составляла 5...10 нс, ширина полосы частот равнялась 0,25...2,5 ГГц, частота повторения импульсов — 60 Гц. Кратковременное (2 мин) воздействие такими импульсами на крыс не вызывало изменений в поведении животных в тестах «открытое поле» и «вынужденное плавание».

Также исследовалось влияние электромагнитных волн на поведение крыс. Использовались три группы животных: первая — контрольная, вторая — подвергшаяся облучению электромагнитными волнами СВЧ-диапазона и третья — подвергшаяся воздействию радиочастотного диапазона. Интенсивность электрической компоненты электромагнитного поля была равна 5 мВ/м, облучение выполнялось ежедневно по 10 мин в течение 10 дней. Способность крыс к обучению и запоминанию оценивалась после каждого сеанса облучения и через 10 дней после последнего сеанса. Крысы 2-й и 3-й групп оказались более способными к обучению и запоминанию, чем животные 1-й группы. Эффект объясняется электромагнитных волн на центральную нервную систему усилением микроциркуляции и возможным прямым эффектом на некоторые структуры коры головного мозга.

Проводились исследования влияния электромагнитных волн с различными длинами волн на поведение крыс. Животные облучались электромагнитным излучением метрового, дециметрового и сантиметрового диапазонов длин волн с плотностью потока падающей мощности 10 мВт/см<sup>2</sup>. Результаты исследований показали, что электромагнитное излучение этих диапазонов может замедлять формирование обычных поведенческих откликов. Это проявлялось при облучении электромагнитными волнами метрового диапазона. В диапазоне сантиметровых волн эффект проявлялся с некоторым временным шагом. Изменения наблюдались при нетепловой интенсивности, и животные легко адаптировались к экспериментальным условиям. Исследовались

эффекты электромагнитного излучения с синусоидальной модуляцией с частотой 2...50 Гц. Несущая частота была равна 30 МГц, и напряженность электрической компоненты составляла 30...120 В/м. Было найдено, что такое воздействие блокировало формирование у животных условных рефлексов.

Экспериментальные исследования биологических эффектов СВЧ-импульсов судовых радаров показали зависимость этих эффектов от интенсивности излучения и длительности облучения. Влияние такого излучения на поведение животных (белых крыс) оценивалось по тесту «открытое поле». Было обнаружено, что реакция на электромагнитное воздействие зависит от типа поведения животных.

Исследования на приматах представляют большой интерес, поскольку их поведение близко к поведению человека. Изучалось влияние УШП импульсов на поведение приматов. Длительность экспозиции была равна 2 мин, а эффективная полоса частот составляла от 0,1...1,5 ГГц. Частота повторения импульсов равнялась 60 Гц, и напряженность электрической компоненты электромагнитного поля составляла 250 кВ/м. Поведение животных оценивалось с использованием теста «площадка эквилибриста», в котором обезьяна должна была компенсировать наклоны площадки, создаваемые по программе компьютера псевдослучайным образом с помощью джойстика.

Помимо этих экспериментов, проводились исследования на бабуинах. Использовалось электромагнитное поле с напряженностью электрической компоненты 30 и 60 кВ/м. Экспозиция этого поля приводила к тому, что обезьяны прекращали свои занятия в первый день воздействия, но на второй день ситуация возвращалась в изначальное состояние. Окончание сеансов экспозиции через 6 недель сопровождалось прекращением деятельности, как и в первый день экспозиции. В измерениях порога чувствительности к электрическому полю у бабуинов — величина 12 кВ/м. Эта величина совпадает с соответствующим значением для крыс и человека.

## **2.5. Изменения в поведении человека под действием электромагнитного излучения**

Информация об эффектах электромагнитного излучения на поведение человека очень скудна: исследовалось влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на функциональное состояние оператора при облучении биологически активной точки T[20] на голове. Результаты исследований показали, что такое воздействие значительно улучшает общее самочувствие и функциональное состояние операторов и повышает их работоспособность. Кроме того, при этом интенсифицируются основные нервные процессы в коре головного мозга.

Косвенную информацию о реакциях нервной системы операторов можно получить из феноменологических наблюдений, например физиологических наблюдений состояния нервной системы персонала, работающего в условиях импульсного облучения электромагнитными волнами низкой интенсивности. Излучение имело следующие параметры: несущая частота — 1 ГГц, частота повторения пачек импульсов — 32 Гц, частота повторения импульсов в пачке — 250 Гц, плотность потока падающей мощности на рабочих местах — от 0,34 до 312 мкВт/см<sup>2</sup>. Были зарегистрированы статистически значимые изменения в функциональной активности нервной системы операторов, включая вегетативные дисфункции. Отмечались синдром вегето-сосудистой дистонии (85 %), астенический синдром (49 %), синдром вестибулопатии (31 %), синдром полинейропатии (87 %). Развитие этих изменений в функционировании нервной системы зависело от стажа работы и, следовательно, от суммарной длительности экспозиции операторов.

Клинические исследования персонала ВВС США, попавшего под электромагнитное облучение, показали, что значительная часть обследованных людей имела психические аномалии. Это жалобы на сильную головную боль, продолжавшуюся несколько недель без каких-либо неврологических симптомов. Необходимо отметить, что не наблюдалось никаких офтальмологических или неврологических нарушений, которые обычно связываются в США с чрезмерной дозой электромагнитного облучения.

Проводились социально-гигиенические исследования с использованием анализа связи между условиями труда и состоянием здоровья у специалистов, облучаемых электромагнитными волнами регулярно в аэропортах. Результаты показали статистически значимое увеличение

частоты заболеваний кардиососудистой и нервной систем и раннее старение организма (на 3,5 года). Нарушения защитных систем организма с формированием иммунодефицита были выявлены в большей степени у персонала, работающего с радарными, чем у людей, соприкасающихся с системами радионавигации и радиокommunikационными системами.

Лечение больных гастродуоденальной язвой [3], включая облучение на частотах 58,0...59,5 и 63,5 ГГц с использованием диэлектрических волноводов, соприкасающихся с точками акупунктуры. Регистрация ЭЭГ показала развитие реакции десинхронизации  $\alpha$ -ритма. На нескольких частотах указанного диапазона пациенты проявляли реакцию инактивации фоновой активности, которая сопровождалась комфортным эмоциональным состоянием, сонливостью.

## **2.6. Целенаправленная коррекция состояния физиологических систем организма**

### **Модуляция иммунного статуса**

Биологические эффекты электромагнитного излучения можно использовать для целенаправленной коррекции состояния иммунной системы организма. Имеется ряд работ, посвященных использованию модификации иммунного статуса воздействием электромагнитных волн. К примеру, исследовалось влияние миллиметрового излучения на выживаемость белых мышей в случае летальной инфекции гриппа. Режимы облучения и результаты испытаний приведены в табл. 2.2.

Согласно табл. 2.2 модификация иммунного статуса мышей имеет временной лаг, и величина модуляции зависит от длительности и режима экспозиции.

Для целенаправленной коррекции отклика иммунной системы может быть использованы генераторы на ИМРАТТ диодах. Медицинские исследования подтвердили эффективность этих приборов при лечении дисфункций нервной системы, нарушений иммунной системы и обмена веществ.

Таблица 2.2

*Влияние миллиметрового излучения на продолжительность жизни мышей, инфицированных вирусом гриппа*

| Номер группы | Режим облучения                    | Длина волны, мм | Смертность животных, % | Средняя продолжительность жизни, дни |
|--------------|------------------------------------|-----------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1            | 14 дней после инфекции             | 7,1             | 42 + 12                | 8,3                                  |
| 2            | 14 дней до инфекции                | 7,1             | 0                      | 14,0                                 |
| 3            | 7 дней до инфекции                 | 7,1             | 36 + 14                | 8,6                                  |
| 4            | 7 дней до и 14 дней после инфекции | 7,1             | 16 + 10                | 11,1                                 |
| 5            | 7 дней до и 14 дней после инфекции | 5,6             | 25 + 13                | 10,1                                 |
| Контроль     | —                                  | —               | 70 + 14                | 7,6                                  |

В работе В.Н. Запорожан [41] было показано, что коррекция иммунного статуса с использованием миллиметровых волн низкой интенсивности позволяет ограничить изменения в иммунной системе, связанные с подавлением Т- и В-систем иммунитета в постоперационный период. В то же время модификация иммунного статуса может иметь положительное и негативное направление. Изучалось действие электромагнитного излучения на клетки иммунной системы мышей. Результаты показали, что электромагнитные волны с частотой 41,95 ГГц подавляет активность таких клеток на 20 %. Супрессия наблюдалась также при использовании этого же излучения, но модулированного с частотами 16 и 50 Гц. При модуляции с частотой 1 Гц в диапазоне несущих частот 41,95...42,05 ГГц была зарегистрирована активация клеток иммунной системы, но в диапазоне 41,8...41,9 ГГц было обнаружено подавление их активности. Таким образом, соответствующий режим экспозиции может целенаправленно изменить статус иммунной системы организма.

### Регуляторное влияние на гемопoэтическую систему

В нескольких сериях экспериментов изучалась возможность регуляции гемопoэзиса в костном мозге. В работе Н.П. Диденко [15] исследовался гемопoэзис в костном мозге бедренных костей мышей в облучаемой и контрлатеральной конечностях. Животные облучались в течение одного часа электромагнитными волнами с длиной волны 7,00...7,30 мм и плотностью потока падающей мощности 10 мВт/см<sup>2</sup>. На третий день после облучения проявлялась слабая реакция эритроидного ростка в некотором увеличении абсолютного количества базофиль-

ных нормобластов. Ретроспективное изучение исходного состояния животных позволило выделить две группы. Группа А — мыши, прогностически «чувствительные» к электромагнитному излучению и характеризующиеся изначально низким содержанием лейкоцитов в периферической крови. Группа Б — «нечувствительные» животные с изначально высоким содержанием лейкоцитов (более чем  $12 \cdot 10^9 \text{ л}^{-1}$ ). Изменения были найдены только в облучаемой конечности. В группе А было зарегистрировано увеличение общего количества эритроидных элементов на 25 %, в том числе базофильных нормобластов.

Другая серия экспериментов [16] была посвящена исследованию прогностической значимости исходного количества эритроцитов в периферической крови при воздействии электромагнитного излучения с теми же параметрами, что и у Н.П. Диденко [15], для мозгового кроветворения у мышей линии СВА. Мыши были разделены на две группы на основе эритропоэтических измерений: «низкоэритроцитарные» — с уровнем менее  $8 \cdot 10^6 \text{ л}^{-1}$  и «высокоэритроцитарные» — с уровнем, превышающим эту величину. Было обнаружено, что изменения костно-мозгового кроветворения инициировались у животных первой группы при экспозиции левой задней конечности, а для мышей второй группы — правой задней конечности.

Таким образом, количество лейкоцитов и эритроцитов в периферической крови являются прогностическим показателем в регуляторном воздействии электромагнитного излучения.

### Инициирование протективного эффекта в отношении вредоносных факторов окружающей среды

Среди неблагоприятных факторов окружающей среды в последнее время наибольшее беспокойство у экологов и медиков вызывают химическое загрязнение и естественные биологические аллергены, приводящие к аллергическим заболеваниям. При таких заболеваниях важно корректировать статус иммунной системы со стороны клеток и гуморального иммунитета. Работа В.П. Адашкевича [17] была посвящена исследованию электромагнитного излучения миллиметрового диапазона как фактора, инициирующего процессы коррекции иммунологических и нейроэндокринных показателей пациентов с атоническими дерматитами. Результаты исследования показали, что использование электромагнитных волн приводит к стабильному улучшению и положительной динамике иммунологических (иммуноглобулины Е, М и G) и нейроэндокринных ( $T_3$ ,  $T_4$ , кортизол, эстрадиол) показателей.

Важную роль в защите организма от неблагоприятного воздействия выполняют антиоксидантная и антитоксическая системы крови. Исследовалось влияние низкоинтенсивного излучения с длиной волны 7,1 мм на системы крови *in vitro*. Было найдено, что при таком воздействии повышалась активность глутатионредуктазы, каталазы и супероксидазы. Глутатионпероксидаза и глутатион-S-трансфераза не реагировали на это воздействие, а реакция глюкоза-6-фосфатдегидрогеназы зависела от уровня исходной активности. При низкой изначальной активности электромагнитное излучение активировало этот фермент, а при высокой исходной активности — понижало его активность. Таким образом, в этом случае эффект носил корректирующий характер.

### Модификация эффектов ионизирующего излучения

Из результатов исследований в этом направлении следует отметить прежде всего те, которые относятся к экспериментам с летальными дозами  $\gamma$ -излучения. Описан эксперимент по протективному действию электромагнитных волн миллиметрового диапазона, выполненный на белых мышах. Результаты эксперимента показали, что предварительная экспозиция животных электромагнитным волнам с частотой 42,19 ГГц в течение 10 дней или предварительная экспозиция в течение 5 дней и экспозиция в течение 30 дней после  $\gamma$ -облучения приводит к снижению смертности в 1,6...2,0 раза при дозе  $\gamma$ -излучения 6,5 Гр. Смертность мышей увеличивалась в 3,3 раза, если они экспонировались электромагнитным волнам только после  $\gamma$ -воздействия.

Использовались СВЧ-импульсы в экспериментах по протективному эффекту электромагнитного излучения на мышах линии СВА. Предварительная экспозиция этим электромагнитным волнам в течение 24 ч увеличивала выживаемость и среднее время жизни при дозе  $\gamma$ -излучения 7,0 Гр в 10 раз и при дозе 7,5 Гр — в 3 раза. Обработка животных такими электромагнитными волнами одновременно с экспозицией  $\gamma$ -излучением (7,0 Гр) приводило к увеличению выживаемости и среднего времени жизни в 5 раз по сравнению с контрольной группой. Но при дозе  $\gamma$ -излучения 8,0 Гр электромагнитные волны не давали протективного эффекта.

Производилась предварительная экспозиция мышей миллиметровым волнам в течение 1 ч за 2 ч до  $\gamma$ -облучения. Протективный эффект миллиметровых волн был зарегистрирован при дозах  $\gamma$ -излучения от 3 до 8 Гр. Наиболее выраженное протективное действие наблюдалось при дозе 4,0 Гр. Следует отметить, что уменьшение у животных стрессорно-

го эффекта, обусловленного экспериментальными условиями, также приводило к увеличению выживаемости. Некоторые экспериментальные условия сами по себе, в частности размещение животных в камерах для облучения, положительно модифицировали эффект ионизирующего излучения, поскольку гиподинамический стресс приводит к стабильной гипоксии, которая обуславливает радиопротективный эффект. Однако, так как при уменьшении степени гипокинетического стресса за счет воздействия миллиметровыми волнами наблюдался протективный эффект электромагнитных волн, то механизмы этих воздействий различны по своей природе, а их направленность противоположна.

## **2.7. Зависимость локальных и общего эффектов от частоты электромагнитных волн, удельной поглощенной мощности от времени воздействия и типа излучения (непрерывный или импульсный режим)**

Зависимость биологических эффектов электромагнитного излучения миллиметрового диапазона от его параметров подробно рассмотрена в обзоре [19]. Прежде всего, отмечается пороговая зависимость эффектов от плотности потока падающей мощности. В экспериментальных условиях, особенно при облучении *in vivo*, трудно определить мощность, поглощаемую биообъектом, но достаточно легко контролировать уровень падающей мощности. Если эксперимент корректен и измерения отраженной и прошедшей мощности успешны, то баланс мощностей позволяет определить величину поглощенной мощности. В любом случае уровень падающей мощности дает верхнюю оценку мощности, поглощенной биообъектом. Поэтому плотность потока падающей мощности является хорошей мерой энергетического взаимодействия биообъектов с электромагнитными волнами. На рис. 2.1 приведена экспериментальная зависимость коэффициента индукции КІ синтеза колицина от плотности потока падающей мощности как пример «порогового» характера биологических эффектов электромагнитных волн. Из этого рисунка следует, что эффект начинает проявляться при некоторой «пороговой» величине плотности потока падающей мощности, и при более мощных потоках величина эффекта остается

неизменной. Величина порога определяется характеристиками биообъекта и условиями воздействия.

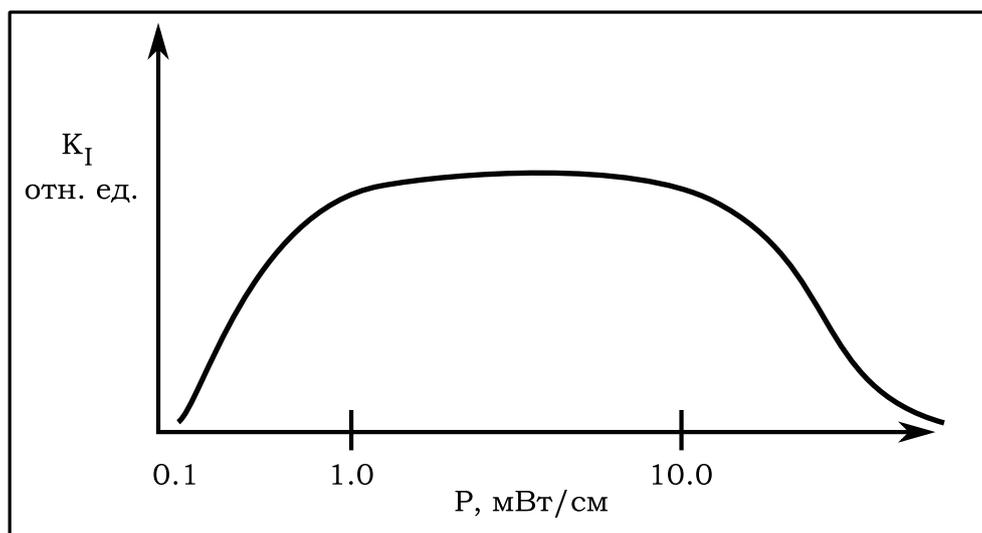


Рис. 2.1. Зависимость синтеза колицина от плотности падающей мощности

Второй особенностью взаимодействия электромагнитных волн с биологическими объектами является резонансность отклика биосистем на электромагнитное воздействие, означающее, что изменение состояния или функции биологического объекта наблюдается только под действием электромагнитного излучения в узком частотном интервале. Относительная ширина этого интервала составляет величину порядка  $10^{-3}$ . Это не означает, что такие изменения в биообъектах проявляются только под действием электромагнитного излучения именно в этом частотном интервале. Существует несколько частот, воздействие на которых обуславливает качественно одинаковый отклик биосистем. Примером такой ситуации может служить зависимость коэффициента индукции колицина  $K_I$  от длины волны воздействующего излучения, приведенная на рис. 2.2.

Были проведены измерения зависимости интенсивности собственного электромагнитного излучения человека от частоты воздействующих электромагнитных волн. Воздействие осуществлялось в диапазоне частот 40...70 ГГц при плотности потока падающей мощности порядка  $1 \text{ мкВт/см}^2$ . Собственное излучение человека регистрировалось в интервале частот  $(1,000 \pm 0,025) \text{ ГГц}$ . Результаты измерений показали, что эта зависимость носит резонансный характер. Центральная частота этого резонанса расположена около значения  $57,8 \text{ ГГц}$ , и его относительная ширина равнялась  $10^{-2}$ . Было отмечено, что отклик на

электромагнитное воздействие наблюдался при интенсивности падающего излучения от 1 до 10 мкВт/см<sup>2</sup>.

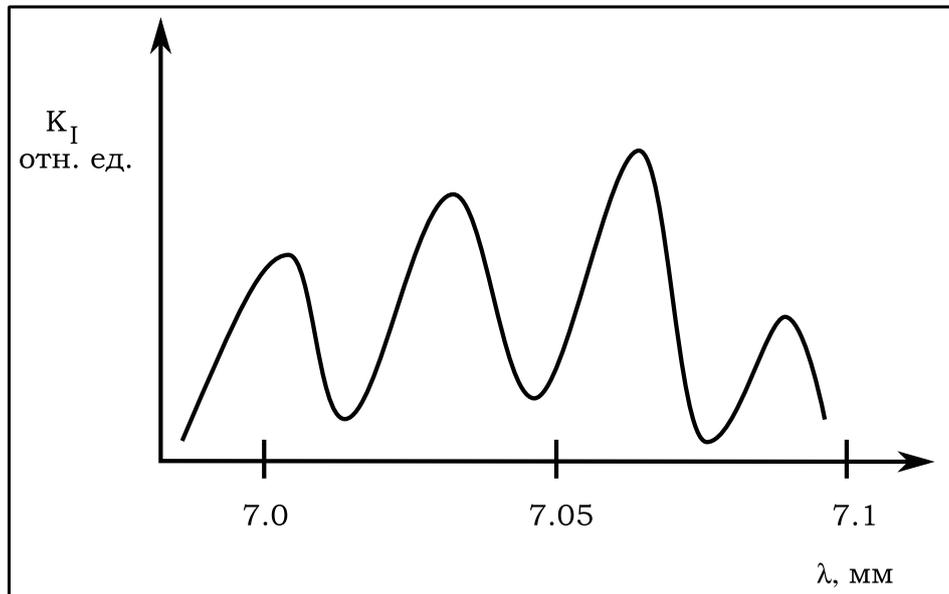


Рис. 2.2. Зависимость индукции колицина от длины волны

Общие эффекты, проявляющиеся на уровне организма, зависят от локализации и продолжительности облучения электромагнитными волнами. Эти зависимости исследовались в ряде работ. Воздействие электромагнитным излучением осуществлялось на мышей на длинах волн 5,6 и 7,1 мм. Облучение производилось в течение 15, 30 и 60 мин при следующих локализациях: а) левое бедро; б) правое бедро; в) затылок. Эффект оценивался по неспецифической резистивности, для чего проводились измерения содержания пероксидазы, кислого и щелочного фосфатов, липидов в нейтрофилах и концентрации сукцинат- и  $\alpha$ -глицерофосфатдегидрогеназ в лимфоцитах.

Данные, полученные в этой работе, свидетельствуют, что при воздействии электромагнитного излучения на длине волны 5,6 мм в течение 60 мин эффект менее выражен, чем при длительности экспозиции 15...30 мин. В последнем случае наблюдалось значительное уменьшение содержания редокс- и гидролитических ферментов в нейтрофилах и лимфоцитах, по сравнению с контролем на 3-й и 5-й дни, и показатели возвращались к исходным значениям к 9-му дню после облучения. Адаптация к электромагнитному излучению с длиной волны 7,1 мм развивалась позднее и менее эффективно, чем в случае облучения на длине волны

5,6 мм. Локализация воздействия также модифицировала эффект электромагнитных волн. Воздействие при облучении затылка было более эффективно, чем при экспозиции внешних поверхностей бедер.

В большинстве работ облучение проводилось на проекции точек акупунктуры. В этом случае механизм воздействия имел неспецифический характер, который, однако же, не связан с локальным нагревом. Исследовалось воздействие электромагнитного излучения с частотой 53,37 ГГц на артериальное давление крыс линии Vistar. Облучение осуществлялось на зону точки акупунктуры жэнь-чан (верхняя треть вертикальной борозды над верхней губой), второй зоной была медианная линия носовой кости. Плотность потока падающей мощности была равна 10 мкВт/см<sup>2</sup>. Результаты эксперимента показали, что электромагнитное излучение влияло только на артериальное давление крыс линии SHR с гипертензией, но совершенно не действовало на крыс линии Vistar. Через 4...6 мин после начала облучения артериальное давление изменялось с 147/101 до 114/62 мм. После окончания облучения артериальное давление возвращалось к исходному уровню. Увеличение плотности потока падающей мощности до 100 мкВт/см<sup>2</sup> приводило к нагреву облучаемой зоны на 3...4 °С, но это не приводило к дополнительным эффектам. Полученные данные свидетельствуют, что действие низкоинтенсивного излучения миллиметрового диапазона на точки акупунктуры не приводит к изменениям функций здорового организма, но нормализует их при патологиях.

## 2.8. Заключение

Таким образом, воздействие электромагнитного излучения соответствующих характеристик проявляется во всех системах организма. Наиболее важные с точки зрения биологии и медицины эффекты электромагнитного излучения на уровне целостного организма приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3

## Влияние СВЧ-излучения на организм

| Система               | Место воздействия         | Параметры излучения  | Результаты   |
|-----------------------|---------------------------|--|--|
| Кожные покровы, ткани | Область раны              | 42,96 ГГц + модуляция 200 МГц                                  | Ускорение заживления ран (стимуляция процесса грануляции)  |
|                       | Кожа бедра                |  | Асимметрия местных эффектов: изменения кровенаполнения, числа тучных клеток, лимфоцитов  |
|                       | Кожа в области шва        | 53,57 ГГц, 4 мВт/см <sup>2</sup>                               | Ускорение регенерации нерва  |
|                       | Кожа                      | 42,25 ГГц  | Разрушение цитоплазмы миелинизированных и немиелинизированных нервных волокон  |
| ЦНС                   | Область головы            |  | Изменение параметров электроэнцефалограммы:<br>1) синхронизация (увеличение числа веретенообразных осцилляций и медленных волн);<br>2) изменение биопотенциалов подкорковых структур (гиппокамп, гипоталамус, ядра таламуса, ретикулярные ядра среднего мозга) |
| ЦНС                   |                           | 58,0...59,6 ГГц, 61,5 ГГц                                      | Десинхронизация $\alpha$ -ритма, активация фоновой активности. Сенсорные ощущения, положительная эмоциональная окраска, сонливость   |
| ЦНС                   |                           | 42,2 ГГц   | Бодрствующие животные – синхронизация.<br>Наркотизированные животные – увеличение высокочастотных $\alpha$ - и $\beta$ -ритмов, увеличение динамичности ЦНС. Эпилептоморфная активность, появление редких (2...4 Гц) высокоамплитудных (> 300 мкВ) пиков       |
| ЦНС                   | Точка 9.9 канал перикарда | 53,596...53,613 ГГц, модуляция 0,05 Гц, <5 мВт/см <sup>2</sup> | Увеличение мощности спектральной составляющей в диапазоне $\alpha$ - и $\beta$ -ритмов, увеличение частоты следования потенциалов действия афферентных волокон срединного нерва. Сенсорные ощущения  |
| ЦНС                   |                           | 7,1 мм, 10 мВт/см <sup>2</sup>                                 | Антистрессорное воздействие: нормализация процессов торможения и активации (таламус и гипоталамус)   |

Продолжение табл. 2.3

|                                   |  |  |   |
|-----------------------------------|--|--|---|
| Вегетативная нервная система      | Тыльная сторона кисти                            | мм, 5 мВт/см <sup>2</sup>  | Изменение сердечного ритма (0,05 Гц, 0,08...0,12 Гц, 0,15...0,5 Гц)   |
|                                   | Общее облучение                                  | хроническое облучение, несущая 1ГГц, пачечн. 32Гц, в пачке 250Гц | Вегетативные дисфункции   |
|                                   | Точка джэнджан + средняя линия носа              | 53,52 ГГц  | Снижение повышенного артериального давления   |
| Нейроэндокринная система          |  | мм   | Резкое повышение уровня серотонина и катехоламинов в лимфатических узлах  |
| Симпато-адреналовая система       | Область большого затылочного бугра               | 5,6 мм, 7,1 мм, 10 мВт/см <sup>2</sup>                           | Коррекция адаптивных изменений (изменение обмена катехоламинов и других медиаторов, цитохимических показателей лимфоцитов, морфологическому состоянию крови, реакция адекватная). Поведенческие реакции – антистрессорное воздействие при нежестком стрессе |
| Поведение (лабораторные животные) |  | UWB пульс. 5 кВ/м, пиковое время 300 пс, прод. 1,8 нс            | Снижение порога чувствительности к ультразвуковому воздействию  |
|                                   |  | М, дм, см, 10 мВт/см <sup>2</sup>                                | Замедление формирования условных рефлексов  |
|                                   |  | 30 МГц синус. модул. 2...5 Гц, 30...120 В/м                      | Блокировка выработки условных рефлексов   |
|                                   |  | 0,25...2,5 ГГц, 5...10 нс, частота повт. 60 Гц                   | Улучшение обучаемости и памяти  |
| Операторы                         | Область большого бугра задней поверхности головы | 53,57 ГГц, 42,25 ГГц, 10 мВт/см <sup>2</sup>                     | Поведенческие реакции: антистрессорное действие при нежестком стрессе   |
|                                   | Точка Т [20] теменной канал                      | мм   | Увеличение работоспособности, улучшение функционального состояния, увеличение подвижности основных нервных процессов в коре головного мозга   |

|   |                      |                                |  |
|---|----------------------|--------------------------------|--|
| Коррек-<br>ция фи-<br>зиологи-<br>ческого<br>состояния                | Общее облу-<br>чение | 53,57 ГГц,<br>42,25 ГГц        | Повышение выживаемости при ин-<br>фицировании летальным гриппом  |
|   | In vitro             | 42,25 ГГц                      | Коррекция антиоксидантной и ан-<br>титоксической систем крови  |
|   | конечности           | мм                             |  |
| 38,96...42,31 ГГц,<br>10 мВт/см <sup>2</sup>                          |                      |                                | Изменение в эритроидном ростке:<br>увеличение количества эритроци-<br>тов и лейкоцитов в перифериче-<br>ской крови |
| Модифи-<br>кация дей-<br>ствия ио-<br>низирую-<br>щего излу-<br>чения | Общее облу-<br>чение | 42,19 ГГц,<br>42,19 ± 0,19 ГГц | Снижение смертности при $\gamma$ -облу-<br>чении.<br>Коррекция статуса иммунной си-<br>стемы.                      |

### Список литературы к главе

1. Изменения в коже при воздействии ЭМИ миллиметрового диапазо-  
на / В.М. Перельмутер [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара  
«Применение СВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и  
медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 53.
2. Крылов В.Н., Ошевенский И.В. Влияние КВЧ-воздействия на изо-  
лированную гладкомышечную ткань кишечника крыс // Миллиме-  
тровые волны в биологии и медицине. – 2000. – № 2. – С. 11–14.
3. Предварительные результаты использования энцефалографических  
критериев для выбора терапевтической частоты электромагнитного  
излучения миллиметрового диапазона при лечении гастродуоденаль-  
ных язв / Алисов А.П. [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара  
«Использование низкоинтенсивного электромагнитного излучения  
миллиметрового диапазона в биологии и медицине», Москва, 1989 г.  
– М., 1989. – С. 8.
4. Лебедева Н.Н., Котровская Т.И. Экспериментально-клинические ис-  
следования в области биологических эффектов миллиметровых волн  
(обзор, часть 1) // Миллиметровые волны в биологии и медицине. –  
1999. – № 4. – С. 3–13.
5. Холодов Ю.А. Эпилептиформная электрическая активность мозга  
при воздействии электромагнитных полей // Электромагнитные по-

- ля и здоровье человека: материалы II междунар. конференции «Проблемы электромагнитной безопасности человека. Фундамент. и прикл. исслед. Нормирование ЭМП: философия, критерии и гармонизация». Москва, 20–24 сентября 1999 г. – М., 1999. – С. 73–74.
6. Сидоренко А.В., Царюк В.В. Биоэлектрическая активность мозга при микроволновом облучении в эксперименте // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2000. – № 4. – С. 12–20.
  7. Холодов Ю.А. Миллиметровое излучение в нейробиологии // Доклады X Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в биологии и медицине». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – С. 155–156.
  8. ЭМИ миллиметрового диапазона от локализации воздействия у крыс с различными типологическими особенностями / Н.А. Темурьянц [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1993 – № 2. – С. 51–59.
  9. Асимметрия адаптационного синдрома, развивающегося при воздействии ЭМИ миллиметрового диапазона / В.М. Перельмутер [и др.] // Тезисы VII Всесоюзного семинара «Применение СВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 63.
  10. Зависимость антистрессорного эффекта ЭМП КВЧ от параметров воздействия / Н.А. Темурьянц [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 3. – С. 11–15.
  11. Исследование стрессопротекторного действия электромагнитных волн КВЧ-диапазона у животных / А.Ю. Арзуманов [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 3. – С. 5–10.
  12. Лебедева Н.Н., Сулимова О.П. Модифицирующее действие миллиметровых волн на функциональное состояние центральной нервной системы человека при моделировании стресса // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 3. – С. 16–21.
  13. Мартынюк В.С., Темурьянц Н.А. Роль перекисного окисления липидов и тиол-дисульфидного обмена в механизмах антистрессорного действия электромагнитного излучения крайне высокой частоты // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1995. – № 5. – С. 6–9.
  14. Влияние электромагнитного излучения крайне высокой частоты на состояние эндокринной, иммунной и протеолитической систем у больных после хирургического удаления доброкачественных опухолей яичников / В.Н. Запорожан [и др.] // Труды XI Всероссийского симпозиума «Миллиметровые волны в биологии и медицине». Москва, 21–24 апреля 1997 г. – М., 1997. – С. 36–38.

15. Возможность прогнозирования и контроля стимулирующего эффекта электромагнитного излучения на эритропоэз у аутбредных белых мышей / Н.П. Диденко [и др]. – 7 с. – Деп. ВИНТИ 26.11.85, № 8154-И85.
16. Зависимость характера реакции эритроидной и лимфоидной систем от их исходного состояния при воздействии электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона / Н.П. Диденко [и др.] // «Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». – М.: ИРЭ АН СССР, 1985. – С. 108–116.
17. Адашкевич В.П. Клиническая эффективность, иммунорегулирующее и нейрогуморальное действие миллиметровой и микроволновой терапии при atopическом дерматите // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1995. – № 6. – С. 30–38.
18. Резунков А.Г., Резункова О.Н. Изучение модифицирующего влияния предварительного воздействия микроволн на выживаемость при лучевой болезни // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1993. – № 2. – С. 59–62.
19. Лебедева Н.Н., Котровская Е.И. Экспериментально-клинические исследования в области биологических эффектов миллиметровых волн (обзор, часть 1) // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1999. – № 3(15) – С. 3–13.

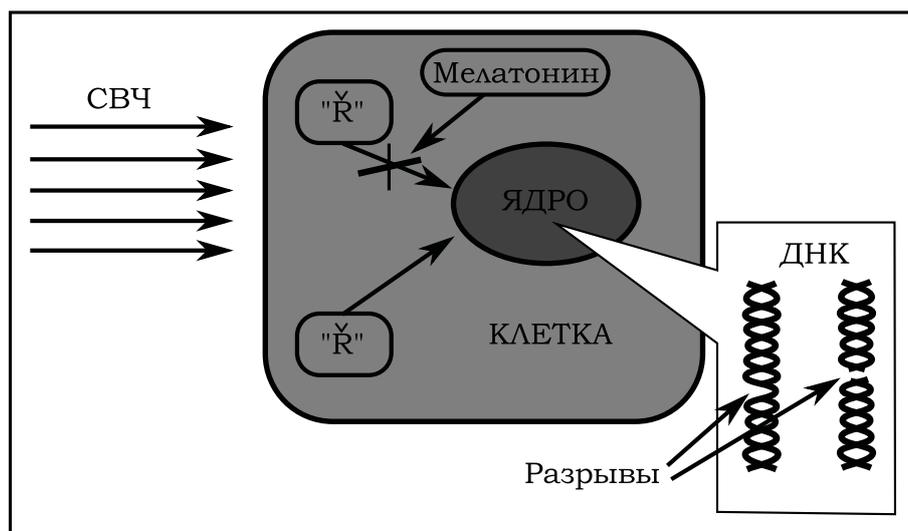
### **3. ПАТОГЕННЫЕ ЭФФЕКТЫ ЭМИ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

В предыдущей главе были рассмотрены регуляторные эффекты электромагнитного излучения на системы организма. Однако особое внимание должно быть уделено патогенным эффектам электромагнитных волн на те системы, которые имеют жизненно важное значение. В первую очередь к ним относятся наследственная, репродуктивная, нейроэндокринная системы. Важно также понять, насколько необратимы такие эффекты, при каких условиях их проявления наиболее значимы. Эта глава посвящена обзору таких работ. В § 3.1 рассмотрено патогенное влияние электромагнитных волн на геном. Возможные механизмы воздействия нетеплового электромагнитного излучения на репродуктивную систему организма проанализированы в § 3.2. Нарушения в нейроэндокринной системе, вызванные влиянием электромагнитных полей, являются темой § 3.3. Параграф 3.4 посвящен рассмотрению вопросов обратимости патогенных эффектов электромагнитного излучения.

#### **3.1. Изменения генома: мутагенный эффект, уродства развития (тератогенное влияние)**

Непосредственное влияние электромагнитного излучения на геном наблюдали в работе Г. Лая, Н. Синха [1], в которой исследовали воздействие СВЧ-импульсов с несущей частотой 2,45 ГГц и плотностью потока падающей мощности 2 мВт/см<sup>2</sup> на взрослых крыс Sprague-Dawley. Методом электрофореза в агарозе исследовали клетки головного мозга крыс через 4 ч после 2-часового облучения. Результаты показали наличие разрывов одиночной и двойной нитей ДНК. Этих разрывов не наблюдалось, если перед или сразу после облучения вводили крысам подкожно мелатонин или внутрибрюшинно N-терт-бутил-афенилнитрон в качестве ловушки свободных радикалов.

Эти результаты позволяют предположить, что воздействие электромагнитных волн на геном носит опосредованный характер. Схематически механизм воздействия показан на рис. 3.1. Электромагнитное излучение инициирует образование свободных радикалов, действие которых на молекулы ДНК приводит к разрывам в одиночных и двойных нитях этих молекул. На этой стадии воздействие электромагнитных волн аналогично действию ионизирующего излучения, хотя механизмы образования свободных радикалов различны.



*Рис. 3.1. Повреждение нитей ДНК в нейронах крыс свободными радикалами (R), образующимися при воздействии импульсного СВЧ-излучения*

Противоположные результаты получены при использовании двух типов частотных модуляций: частотно-модулированного непрерывного излучения, с центральной частотой 835,62 МГц, кодовой модуляцией со средним значением частоты 847,74 МГц при удельной поглощенной мощности 0,6 Вт/кг [2]. Влияние нагрева исключалось путем поддержания постоянной температуры 37,0 °С. Экспонирование культуры клеток млекопитающих (клетки мышинных фибробластов СЗН 10Т1/2 и клетки глиобластомы человека – U87MG) не вызывает повреждения ДНК, что подтверждено результатами щелочного «комет»-анализа.

Опосредованное изучение эффектов электромагнитного излучения на геном было проведено на дрозофилах [3]. Облучали эмбрионы дрозофил возраста 1,5 и 15 ч непрерывным потоком мощности на частоте 460 МГц. Эффект воздействия оценивался по величине прерванного развития, определяемого как процент невыплода имаго относительно количества эмбрионов и являющегося мерой крайнего проявле-

ния тератогенеза. Влияния радиочастотного сигнала на процент прерванного развития эмбрионов возрастов 1 и 5 ч не было обнаружено. Для 15-часовых эмбрионов эффект зависел от дозы поглощенной мощности. Процент прерванного развития увеличился в 1,4 раза только при удельной поглощенной мощности 6 Вт/кг.

Появление индуцированных радиочастотным электромагнитным излучением изменений в геноме лимфоцитов периферической крови у людей, облучавшихся вследствие своей профессиональной деятельности, отмечено в работе Н.Д. Девяткова и др. [4]. Наличие изменений в геноме было определено по возросшей частоте микроядер и модификации распределения клеток по первому, второму и третьему митотическим классам. Облучение лимфоцитов электромагнитным полем с частотой 50 Гц также вносит изменения в геном этих клеток. При облучении лимфоцитов с латентно инфицированным вирусом Эпштейна-Бара было зафиксировано увеличение числа клеток, экспрессировавших антиген того вируса [5]. Это указывает на изменения в ДНК, модифицирующие считывание генетической информации, под воздействием внешнего электромагнитного излучения. Изменения в хромосомах лейкоцитов отмечается и в исследованиях Н.П. Диденко и др. [6].

К последствиям мутагенного эффекта электромагнитного излучения следует отнести возникновение опухолей, связанное с изменением генетической информации. Вместе с тем изучение возможности канцерогенного эффекта СВЧ-излучения, как правило, дает отрицательный результат. О возможности увеличения распространения рака при воздействии радиочастотного излучения указывается в статье Дж. Голдсмита [6]. В обзоре Л. Вершаевой [7] проанализированы сообщения, в которых большинство исследователей обнаружило увеличение частоты заболеваний лейкозом и опухолями ЦНС среди детей, подвергающихся воздействию электромагнитного излучения.

Для объяснения механизма воздействия микроволнового излучения низкой мощности и радиочастотных полей на биологические системы в условиях, когда температура исследуемого объекта не изменяется значительно в процессе эксперимента, предложена гипотеза о том, что нетепловые дозы микроволнового и радиочастотного излучения могут запускать каскад реакций, в частности перекисного окисления липидов с образованием свободных радикалов кислорода, которые приводят к мутагенезу и канцерогенезу [8].

### 3.2. Воздействие на половую (репродуктивную) систему

Изменения в геноме под воздействием электромагнитного излучения, рассмотренные в предыдущем параграфе, несомненно могут иметь репродуктивные последствия. Возможным проявлением такого влияния на геном является изменение соотношения полов, обнаруженное в работе В. Джеймса [9]. Воздействие высокочастотными электромагнитными полями на матерей приводило к большему появлению девочек. Показательно, что это влияние отличается от действия ионизирующего излучения, которое вызывает связанные с полом летальные мутации.

Однако изменения в соотношении полов могут быть связаны и с модификацией функционирования половой системы. В работе М. Акдага и др. [10] показано, что микроволновое излучение существенно влияет на половую систему. В ходе исследования крысы-самцы линии Sprague-Dawley облучались электромагнитными волнами частотой 9,45 ГГц при плотности потока падающей мощности 2,65 мВт/см<sup>2</sup> и с удельной поглощенной дозой 1,8 Вт/кг ежедневно по 1 ч в течение 13, 26, 39 и 52 дней. Обнаружено заметное снижение семенной жидкости в придатках, но только после 52-дневной экспозиции. Процентное содержание аномальной семенной жидкости заметно менялось после 26, 39 и 52 дней облучения, при этом достоверно изменялся вес яичек и придатков.

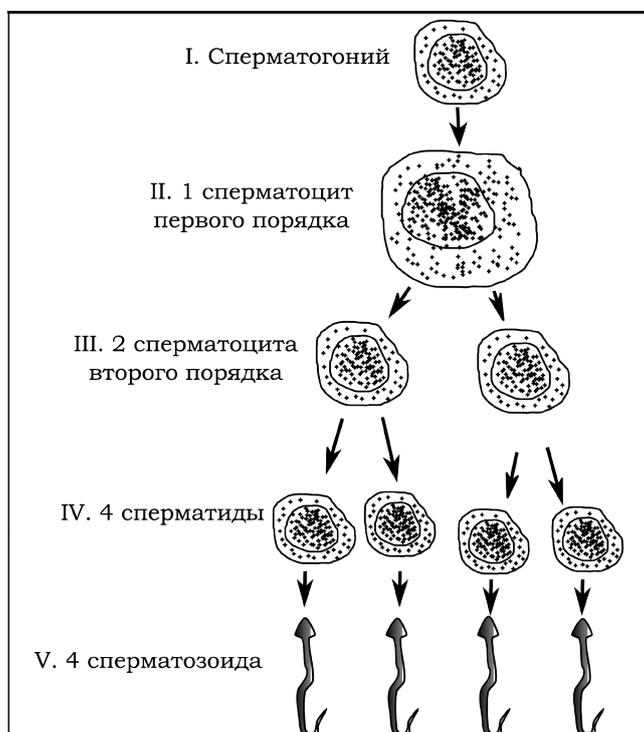


Рис. 3.2. Схема сперматогенеза

В яичках экспонированных крыс отмечались некротические изменения в канальцах, интерстициальный отек, уменьшение сперматогенеза и, в некоторых канальцах, отсутствие зародышевого эпителия. На рис. 3.2 представлен процесс сперматогенеза. СВЧ-излучение нарушает сперматогенез в семенных канальцах: на стадии I вызывает торможение дифференцировки сперматогоний, на стадиях II–IV – некроз клеток-предшественников сперматозоидов. В придатках наблюдались атрофия, интерстициальный отек, инфильтрация клетками и повышенная активность фибробластов.

Таким образом, хроническое облучение низкоинтенсивным СВЧ-излучением приводит к изменениям функционального и морфологического состояния половой системы. По-видимому, морфофункциональные изменения в половой системе, подобные описанным выше, обуславливают повышение частоты неблагоприятных репродуктивных исходов, особенно спонтанных абортов.

### **3.3. Нарушения нейроэндокринной регуляции**

Помимо рассмотренных выше систем быстрый отклик на воздействие электромагнитного излучения присущ и нейроэндокринной системе. В работе Н.И. Карпиковой, С.Н. Лукьяновой [11] рассмотрено влияние на нейроэндокринную систему модулированного СВЧ-излучения. Воздействующее излучение имело следующие характеристики: несущая частота – 1 ГГц, частота импульсов – 250 Гц, частота пачек – 32 Гц, плотность потока падающей мощности на рабочих местах – от 0,34 до 314 мкВт/см<sup>2</sup>. Клинико-нейрофизиологическая оценка состояния здоровья персонала, работающего в этих условиях, свидетельствует о развитии статистически достоверных изменений в функционировании нервной системы. Феноменология этих изменений представлена симптомокомплексом вегетативных дисфункций: синдром вегетососудистой дистонии (ВСД – 85 %), астенический синдром (49 %), синдром вестибулопатии (21 %), синдром полиневропатии (87 %). Развитие симптомокомплекса вегетативных дисфункций зависит от стажа работы: 1–5 лет – ВСД по гипертоническому типу, 6–25 лет – ВСД по массивному типу, 26–35 лет – артериальная гипертония.

Возможна общая реакция нейроэндокринной системы на острое местное облучение СВЧ-волнами. В статье П. Марчiori [12] описан случай множественной острой нейропатии или после случайного облучения от микроволновой печи с неисправной блокировкой излучения при открывании дверцы. Пострадавшая опустила правую руку в камеру печи, левую положила на дверцу и заглянула в открытую камеру. Через 10 мин она почувствовала онемение и покалывание в кончиках пальцев правой руки. На следующий день в правой руке появилась жгучая боль. Затем в левой руке возникли парестезии и снижение чувствительности. Через 10 дней усилились болевые ощущения, появились дистрофические изменения в ногтях правой руки. Нарушения чувствительности появились в правой половине лица, снизилась острота зрения правого глаза.

Изменения функционального состояния ЦНС возникают и в условиях воздействия СВЧ-излучения с терапевтической целью. В работе А.А. Ковалева [13] изучали пространственную организацию корковых процессов и функциональную значимость ее динамики при воздействии ММ-ЭМИ нетепловой интенсивности. Электроэнцефалографическое обследование во время локального КВЧ-воздействия было выполнено 85 пациентам в возрасте от 18 до 56 лет, находившимся на стационарном лечении по поводу хронической висцеральной патологии без признаков поражения центральной нервной системы (ЦНС). Перестройка когерентного состава ЭЭГ наблюдалась в отдельных узкополостных областях альфа-диапазона на фоне характерных для нормы показателей психосоматического статуса организма или нормализации под влиянием КВЧ. При наличии некорректируемых патологических отклонений функционального состояния сферы соматовисцеральной иннервации преобладающие сдвиги пространственной синхронизации проявлялись в активации 15 когерентной структуры. Возможно, эти проявления являются отражением функционирования механизма регуляции гомеостаза.

При локальном воздействии различных электромагнитных полей наблюдали сходную сенсорную индикацию у человека [14]. Возникающие слабые ощущения свидетельствуют об участии ноцицептивной системы в реакциях на электромагнитное излучение, т. е. болевой характер реакции. При исследовании ЭЭГ у людей возникала реакция синхронизации. В реакциях на электромагнитные волны отмечена большая заинтересованность передних отделов правого полушария головного мозга. Преобладание медленноволновой активности на ЭЭГ хорошо согласуется с тормозным влиянием электромагнитного излучения на условно-рефлекторную деятельность. Более ранимы процессы форми-

рования и сохранения условных рефлексов. Автор приходит к заключению, что совокупность реакций мозга свидетельствует о начальной адаптационной реакции мозга на ЭМП, которая играет важную роль как в терапевтическом, так и в патогенном влиянии ЭМП на организм.

### **3.4. Обратимость изменений систем, чувствительных к воздействию ЭМИ СВЧ-диапазона**

В немногих работах при описании патогенных эффектов авторами оценивается обратимость изменений и отдаленные последствия использования СВЧ-излучения. Обратимым оказалось нарушение сперматогенеза у крыс при длительном (в течение 3 мес.) облучение электромагнитным полем с длиной волны 8 мм и мощностью 35 мкВт/см<sup>2</sup> [15]. Спустя 3 месяца после окончания непрерывного облучения количество сперматозоидов не только восстановилось, но и оказалось выше исходного уровня.

При проведении терапии 528 больных с различной патологией с помощью установок СВЧ-терапии миллиметрового диапазона нетеплового уровня [16] у 3 пациентов возникли изменения со стороны кожи. У больной М. (36 лет), лечившейся по поводу ревматоидного полиартрита, на 5-й день СВЧ-терапии на фоне уменьшения симптомов основного заболевания появилось осложнение — зудящая сыпь в области груди, живота, которая к 7-му дню распространилась на все тело. Через 10 дней после прекращения СВЧ-терапии сыпь исчезла. При повторении курса СВЧ-терапии через 3 мес. осложнение повторилось. Больная Я. (46 лет) получила 2 курса терапии (18 и 15 процедур) при лечении псориаза. При проведении каждого курса на 5–7 день появилась зудящая уртикарная сыпь по всему телу, исчезающая по окончании лечения. Больная Г. (54 года) получила 3 курса терапии при лечении язвенной болезни 12-перстной кишки. На 5–7 день проведения каждого курса появилась зудящая сыпь типа крапивницы по всему телу. После прекращения лечения сыпь исчезала. Во всех случаях лечение основного заболевания было эффективным.

Анализ результатов воздействия СВЧ-излучения позволяет прийти к заключению, что в основе патогенного действия может лежать акти-

вация перекисного окисления липидов с образованием свободных радикалов кислорода. Последние повреждают геном, обуславливая мутации, лежащие в основе как тератогенеза (увеличение процента невыплода имаго дрозофил), так и канцерогенеза. Эффекты во многом зависят от уровня поглощенной мощности и от времени воздействия СВЧ-излучения. Как и при действии других физических, токсических и стрессорных факторов, при облучении СВЧ-полем одной из наиболее чувствительных систем является сперматогенез. Под влиянием импульсного СВЧ-излучения у людей могут возникать существенные нарушения функционирования ЦНС. Это не удивительно, так как даже воздействие СВЧ-излучения с терапевтическими параметрами приводит к изменению характеристик ЭЭГ. Важно подчеркнуть, что обнаруживаемые нарушения условно-рефлекторной деятельности имеют в определенной степени стереотипный характер и не зависят от параметров электромагнитного излучения (от низкочастотных до полей миллиметрового диапазона).

Следует согласиться с М. Лиангом и В. Зангом [17], что основной проблемой изучения влияния СВЧ-излучения на человеческую популяцию является неясность биологических механизмов и слабые экспериментальные доказательства эффектов.

### *Список литературы к главе*

1. Henry L., Narendra S.P. Melatonin and a sping-trap compound block radiofrequency electromagnetic radiation-induced DNA strand breaks in rat brain cells // *Bioelectromagnetics*. – 1997. – № 6. – P. 446–454.
2. Measurement of DNA damage after exposure to 2450 MHz electromagnetic radiation / R.S. Malyapa [et al.] // *Radiat. Res.* – 1997. – № 6. – P. 608–617.
3. Большаков М.А. Действие электромагнитного излучения 460 МГц на эмбрионы дрозофил разного возраста / М.А. Большаков, И.Р. Князева, Е.В. Евдокимов // I Международный симпозиум «Фундамент. науки и альтернатив. мед.». Пушино, 22–25 сент., 1997 г. – Пушино, 1997. – С. 52–53.
4. Garaj-Vrhovac V. Micronucleus assay and lymphocyte mitotic activity in risk assessment of occupational exposure to microwave radiation // *Chemosphere*. – 1999. – V. 39 (13). – P. 2301–2312.
5. Magnetic fields and childhood cancer – a pooled analysis of two Scandinavian studies / M. Feychting [et al.] // *Energ. Sante*. – 1996. – V. 2. – P. 303–304.

6. Goldsmith J. R. Epidemiological studies of radio-frequency radiation: Current status and areas of concern // Int. Conf. «Eff. RF-Electromagn. Radiat. Org.». Skrunđa, June 17–21 1994. – Sci. Total Environ., 1996. – № 1. – С. 3–8.
7. Verschaeve L. Can non ionizing radiation induce cancer? // J. Cancer. – 1995. – V. 5. – P. 237–249.
8. Sarkar S. Biological consequences of microwave stress: Implications for mutagenesis and carcinogenesis / S. Sarkar, W. Selvamurthy, M.M. Gupta // IETE Techn. Rev. – 1997. – V. 3. – P. 153–163.
9. James W.H. The sex ratios of offspring of people exposed to non-ionizing radiation // Occup. and Environ. Med. – 1997. – № 8. – P. 622–623.
10. Effect of chronic low-intensity microwave radiation on sperm count, sperm morphology, and testicular and epididymal tissues of rats / M.Z. Akdag [et al.] // Electro- and Magnetobiol. – 1999. – № 2. – P. 133–145.
11. Карпикова Н.И., Лукьянова С.Н. Клинико-нейрофизиологическое исследование состояния нервной системы, работающей в условиях пачечно-импульсного СВЧ-облучения низкой интенсивности. III Съезд по радиац. исслед. «Радиобиол., радиоэкол., радиац. безопас». Москва, 14-17 октября 1997 г. – Пушкино, 1997. – Т. 3. – С. 188–189.
12. Acute multiple mononeuropathy after accidental exposure to oven microwaves / P.E. Marchiori [et al.] // Occup. Med. – 1995. – V. 5. – P. 276–277.
13. Ковалев А.А. Неосознаваемые эффекты влияния нетепловых электромагнитных излучений миллиметрового диапазона на интегративные звенья саморегуляции гомеостаза организма человека // Миллиметровые волны в биол. и мед. – 1997. – № 9–10. – С. 18–24.
14. Холодов Ю.А. Начальная адаптационная реакция мозга на электромагнитные поля // Миллиметровые волны в медицине и биологии. – 1997. – С. 156–157.
15. Некоторые показатели сперматогенеза крыс после воздействия микроволн / А.В. Люлько [и др.] // V Всесюзный семинар «Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 66–67.
16. Гунько В.Т., Кожина Н.М.. О некоторых осложнениях КВЧ-терапии // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1993. – № 2. – С. 102–103.
17. Mingshan L., Wenyan Zh.. Influence of microwave radiation on superoxidodismutase and fat peroxide products of mices // Dongwuxue zazhi. – 1995. – № 6. – P. 24–27.

#### **4. ТЕРАПЕВТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ЭМИ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

Как было показано в главе 1, влияние электромагнитного излучения может иметь направленность как положительную с биологической точки зрения, так и отрицательную. Патологические проявления этого влияния были подробно рассмотрены в предыдущей главе. Однако многочисленные исследования, продемонстрировавшие разнообразные эффекты СВЧ-излучения на биологические объекты разного уровня организации, позволяют рассматривать их как основу для широкого испытания возможности использования СВЧ-излучения для терапии различных заболеваний. Данная глава как раз посвящена терапевтическим приложениям электромагнитных волн. В § 4.1 сделан краткий обзор терапевтических эффектов электромагнитного излучения теплового уровня мощности. Параграф 4.2 посвящен рассмотрению терапевтического воздействия электромагнитных волн нетеплового уровня мощности. Микроволновой терапии наиболее важных систем человеческого организма посвящены отдельные параграфы. В § 4.3 рассмотрено терапевтическое влияние электромагнитного излучения на кроветворную систему. Терапевтические эффекты электромагнитных волн на иммунную систему являются темой § 4.4. Параграф 4.5 посвящен вопросам воздействия электромагнитного излучения на заживление язв желудочно-кишечного тракта. В § 4.6 рассмотрены вопросы электромагнитной стимуляции регенерации костной ткани. Параграф 4.7 посвящен определению зависимости терапевтических эффектов электромагнитного излучения от его параметров.

#### **4.1. Терапевтические эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона теплового уровня мощности**

Терапевтические эффекты электромагнитного излучения связаны с нагревом биологических тканей. В литературе имеются данные о терморегуляторных реакциях у человека при тотальном облучении его микроволнами, вызывающими повышение температуры глубоких тканей. При определении порога восприятия теплового воздействия в срединной области спины у взрослых мужчин оказалось, что чувствительность монотонно возрастает с увеличением частоты микроволнового излучения в интервале частот 2,5...94 ГГц. Порог, определяемый при частоте 94 ГГц, оказался более чем на порядок ниже, чем при частоте 2,5 ГГц, и сопоставимым с порогом восприятия ИК-излучения [1]. При более низких частотах эффекты, связанные с тепловым воздействием, могут не сопровождаться сильным сенсорным восприятием.

#### **4.2. Терапевтические эффекты ЭМИ СВЧ-диапазона нетеплового уровня мощности**

В опубликованном в 1998 г. обзоре ВОЗ проанализировано биологическое действие радиочастотных электромагнитных полей (от 10 МГц до 300 ГГц) низкой интенсивности [2]. В нем были отмечены многочисленные пробелы знаний в этой области, требующие дополнительных исследований. Вместе с тем указано на наличие публикаций по терапевтическому применению низкоинтенсивного электромагнитного излучения.

Испытана возможность лечения патологии щитовидной железы с использованием низкоинтенсивного излучения миллиметрового диапазона [3]. Терапия 284 пациентов с диффузным токсическим зобом, диффузным нетоксическим зобом и узловыми формами зоба привела к уменьшению объема железы у большинства больных. В результате проведенной терапии у больных с диффузным тиреотоксическим зобом нормализовался уровень лимфоцитов  $T_3$  и  $T_4$  в сыворотке крови и купировался синдром тиреотоксикоза. Ни в одной из групп наблюдения авторы не обнаружили отрицательных побочных эффектов терапии миллиметровыми волнами.

Воздействие на точки акупунктуры низкоинтенсивного миллиметрового излучения у больных (16 дней, по 5 мин на 5...7 точек) с ишемическим инсультом привело к заметным терапевтическим эффектам [4]. Отмечено более раннее восстановление речи, почти в 3,5 раза реже течение болезни осложнялось развитием пневмонии.

Для лечения гиперплазии предстательной железы (ГПЖ) и хронического простатита (ХП) совместно с гипербарической оксигенацией использовалось 10 процедур СВЧ-излучения миллиметрового диапазона с длиной волны 5,6 и 7,1 мм в режиме частотной модуляции и плотностью потока мощности 10 мВт/см<sup>2</sup> [5]. Несмотря на то, что лечение не привело к уменьшению объема предстательной железы, у больных с сочетанием ГПЖ и ХП удалось не только добиться улучшения параметров мочеиспускания, но и уменьшить интенсивность воспалительной реакции. О последнем свидетельствовало снижение более чем в 2 раза количества лейкоцитов в секрете простаты. При изолированной ГПЖ терапевтический эффект отсутствовал.

### **4.3. Стимуляция кроветворения**

Электромагнитное излучение может оказывать стимулирующее действие на кроветворную систему человека. Так, при лечении ожоговых больных под влиянием электромагнитных волн с длиной волны 7,1 мм увеличивалось количество ретикулоцитов в группах с ожогами лица площадью менее 10 % и с ожогами туловища – до 20 % поверхности [6]. В группе с ожогами туловища площадью от 10 до 30 % эффект отсутствовал. Данный клинический эффект стимуляции эритропоэза согласуется с результатами, демонстрирующими повышение репопуляции стволовыми клетками костного мозга мышей-гибридов линий СВА и С57В16 (F1) после облучения их электромагнитным излучением с длиной волны 7,1 мм [7].

Условия стимуляции образования эритроцитов в костном мозге животных изучены в статье Н.П. Диденко и др. [8]. Установлено, что реакция кроветворной системы зависит от ее исходного состояния и места воздействия ЭМИ. Учитывая эти условия, оказалось возможным прогнозировать и контролировать стимулирующий эффект ЭМИ на эритропоэз как у интактных животных [9], так и при коррекции анемии после кровопотери [10].

#### **4.4. Стимуляция иммунной системы**

Способность СВЧ-излучения, с одной стороны, воздействовать на клеточный метаболизм и, с другой, изменять состояние нейроэндокринной системы дает основание предполагать и возможность модуляции иммунной системы. Изменение иммунного статуса при СВЧ-терапии зарегистрированы у 16 больных острым инфарктом миокарда, которым облучали в течение 60 мин кожу голени СВЧ-излучением с длиной волны 5,6 мм [11]. Всего было 14 процедур. Обнаружена тенденция к увеличению Т- и В-лимфоцитов, при этом количество Т-хелперов не менялось, а Т-супрессоров – уменьшалось. Увеличивалось содержание иммуноглобулинов IgG и IgM, а IgA – уменьшалось. Эти изменения иммунных показателей сопровождались улучшением клинической картины: уменьшением интенсивности, количества приступов загрудинных болей, более быстрой положительной динамикой ЭКГ.

В основе иммуномодифицирующего действия СВЧ-излучения лежит образование свободных радикалов. Это доказывают данные по исследованию воздействия слабых электромагнитных полей (8...18 ГГц, 1 мкВт/см<sup>2</sup>), под влиянием которых увеличивалась индукция фактора некроза опухолей макрофагов мышей. Применение убихинонов, являющихся антиоксидантами, редуцирует эффекты электромагнитных полей в диапазоне СВЧ-излучений [12].

#### **4.5. Влияние на заживление язв желудочно-кишечного тракта**

Язвенная болезнь остается актуальной проблемой медицины, для решения которой ведутся постоянные поиски более эффективных способов лечения. Не удивительно, что язвенная болезнь желудка и двенадцатиперстной кишки была одним из первых заболеваний, при котором испытывалась возможность использования СВЧ-терапии. У Е.С. Тимофеевой [13] обобщены результаты терапии электромагнитным излучением с длиной волны 7,1 и 5,6 мм 534 больных язвенной болезнью. Облучали биологически активные точки (от 1 до 4 областей за один сеанс) в течение 40 мин. Две трети составляли пациенты со средним или тяжелым течением болезни. В зависимости от варианта ком-

бинации электромагнитной терапии с традиционными схемами лечения было выделено 4 группы больных. Эффективность лечения контролировали фиброгастродуоденоскопией и гистологическим исследованием биоптата из краев язвы. Результаты позволили автору сделать вывод о высокой эффективности КВЧ-терапии язвенной болезни. При этом монотерапия электромагнитными волнами не отличалась по эффективности от сочетания с медикаментозными схемами лечения. Вместе с тем отмечена плохая переносимость электромагнитной терапии у 6 больных, что было причиной прекращения лечения. У 17 больных положительный эффект КВЧ-терапии отсутствовал или возникали ранние рецидивы заболевания. Оказалось, что у всех этих больных были осложненные варианты течения язвенной болезни.

Использование электромагнитных волн с частотой 62 ГГц и плотностью потока мощности до 3 мВт/см<sup>2</sup> в режиме непрерывной генерации или в режиме импульсной генерации дало положительный эффект лечения язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки, включая осложненные формы этих болезней [14].

Комплексное лечение язв двенадцатиперстной кишки с применением электромагнитной терапии по результатам гистологического исследования уменьшало выраженность воспалительной инфильтрации и образования соединительной ткани в зоне язвы. В то же время у большинства больных достигалось полное удаление *Helicobacter pylori* и стимуляция регенераторных процессов, включая нормализацию состояния эндокринных элементов слизистой кишки [15].

Для выяснения природы лечебного воздействия электромагнитного излучения и исключения ведущей роли в этих психофизиологических процессах, связанных с ожиданием пациентом положительного эффекта (эффект плацебо) проведена сравнительная оценка имитации и «истинного» воздействия миллиметровых волн низкой интенсивности [16]. Оказалось, что терапевтический эффект имитации КВЧ-терапии проявлялся 75 % полным или неполным заживлением гастродуоденальных язв. Реальное воздействие КВЧ-излучения на точки акупунктуры или зоны Захарьина—Геда давало 20...30 % увеличение количества полного излечения язв.

## 4.6. Стимуляция регенерации костной ткани

Было установлено благоприятное действие электромагнитной терапии на течение раневого процесса у больных с повреждениями конечностей, осложненными гнойной инфекцией, особенно для больных с неблагоприятной динамикой при отсутствии лекарственных и других необходимых для лечения средств [17]. Электромагнитная терапия оказалась полезной в комплексной терапии деформирующего остеоартроза [18].

Терапевтические эффекты электрического и магнитного полей изучались, в основном, с целью их применением для восстановления соединительных тканей. Наиболее изученные методы касаются восстановления костей и обеспечивают сокращение сроков лечения свежих переломов, несращений, осложнений при трансплантации костной ткани, остеопороза и остеонекроза. Сообщалось о применении эффектов электромагнитного поля для восстановления хрящей и мягких фиброзных тканей. Во всех этих экспериментальных работах и клинических применениях наблюдался ускоренный синтез внеклеточного матрикса и сокращение сроков лечения тканей [19].

Имеется много свидетельств того, что в живой кости генерируются постоянный ток и переменное электрическое поле за счет метаболических процессов и механических деформаций, соответственно. Внешний постоянный ток применяется для лечения несращений в качестве средства стимуляции митоза и восстановления остеогенных клеток, возможно, за счет электрохимических реакций на границе электрод–ткань. Переменные электромагнитные поля также используются для лечения несращений, остеонекроза и остеоартрита, стабилизации имплантантов [20].

Импульсные электромагнитные поля влияют на рост костей и хрящей *in vitro*, что делает их потенциально полезными в лечении артритов. Стимуляция этими полями уже является апробированным методом при лечении запущенных переломов и имеет перспективы применения для лечения остеоартрита, остеонекроза, остеопороза и ран. Постоянные магниты могут в определенных обстоятельствах обеспечить временное снижение болевого синдрома [21].

#### **4.7. Зависимость лечебных эффектов от удельной поглощенной мощности, частоты, времени действия излучения, непрерывного и импульсного режимов с учетом длительности импульсов, частоты повторения, параметров формы импульсов ЭМИ СВЧ-диапазона**

При всей важности изучения зависимости терапевтического эффекта СВЧ-терапии от параметров электромагнитного излучения, данный аспект остается наименее изученным. Сравнивали эффективность разных вариантов электромагнитной терапии у 23 больных с прогрессирующей стенокардией [22]. В первой группе использовали источник излучения с длиной волны 7,1 мм. Длительность процедуры составляла 60 мин на протяжении 10 дней. Во второй группе больных 5 дней облучали источником с длиной волны 5,6 мм и 5 дней — с длиной волны 7,1 мм. Мощность излучения 10 мВт/см<sup>2</sup>. Под влиянием электромагнитных волн происходит урежение темпа сердечного ритма. Результат не зависел от длины волны и схемы использования КВЧ-терапии.

Исследование влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения (1...2 мкВт/см<sup>2</sup>) в диапазоне частот от 26 до 140 ГГц на организм человека с помощью метода электроakupунктурной диагностики (ЭАД) по Р. Фоллю показало наличие четырех биологически активных диапазонов, которые разделены относительно спокойными частотными интервалами и отличаются типом взаимодействия излучения с организмом [23]. А именно: 8 мм диапазон характеризуется обще конституциональным тонизирующим типом воздействия, 5 мм — локальным нормализующим, 4 мм — обще конституциональным седатирующим, 2,5 мм — локальным нормализующим типом воздействия.

#### **4.8. Заключение**

Результаты СВЧ-терапии свидетельствуют об ее определенной эффективности при коррекции состояния кроветворной, иммунной систем, стимуляции регенерации язвенных дефектов желудка и двенадцатиперстной кишки, костной и соединительной ткани (табл. 4.1). Вместе с тем бросается в глаза недостаточное определение показаний и противопоказаний для СВЧ-терапии. Как правило, физические параметры излучения

при лечении того или иного заболевания выбираются без должного обоснования, без попытки подобрать оптимальный режим воздействия. Не учитывается надлежащим образом исходное состояние физиологических систем, которые в условиях патологии реагируют на воздействие СВЧ-излучения во многом определяя его результат. Решение этих задач может быть перспективным для повышения результативности СВЧ-терапии.

Таблица 4.1

*Терапевтические эффекты СВЧ-излучения*

| Система                     | Место воздействия           | Параметры излучения                       | Результаты  |
|-----------------------------|-----------------------------|---|---|
| Эндокринная система         |                             | мм  | Уменьшение объема щитовидной железы у больных диффузным токсическим зобом, нормализация уровня лимфоцитов Т3 и Т4   |
| Иммунная система            | Голень                      | 5,6 мм                                    | Изменение иммунного статуса больных с острым инфарктом (увеличение количества Т- и В-лимфоцитов, IgG и IgM, снижение уровня IgA) – улучшение клинической картины  |
| Желудочно-кишечный тракт    | Биологически-активные точки | 7,1 мм,<br>5,6 мм                         | Высокая эффективность при лечении язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки (неосложненные)  |
|                             |                             | 62 ГГц,<br>3 мВт/см <sup>2</sup>          | Лечение язвенной болезни желудка и 12-перстной кишки, в том числе и осложненных, уменьшение воспалительного инфильтрата, ускорение регенерации, нормализация состояния эндокринных элементов слизистой кишечника                          |
| Сердечно-сосудистая система |                             | мм < 10 мВт/см <sup>2</sup>               | Сокращение сроков выздоровления, снижение вероятности осложнений инсульта (пневмоний)   |
| Мочеполовая система         |                             | 5,6 мм; 7,1 мм,<br>10 мВт/см <sup>2</sup> | Улучшение терапевтической эффективности, уменьшение воспалений при одновременном лечении гиперплазии предстательной железы и хронического простатита  |
| Кровотворная система        | Голень                      | 7,1 мм                                    | Стимуляция эритропоэза при ожоговой болезни (рост числа ретикулоцитов)  |
| Опорно-двигательная система |                             | 53,53 ГГц,<br>42,96 ГГц,<br>модуляция     | Ускорение заживления ран, активация воспалительной реакции, стимулирование процесса формирования рубца, активизация синтеза внеклеточных белков.<br>Улучшения при комплексной терапии деформирующего остеопороза, переломов, остеонекрозе |

### Список литературы к главе

1. Human sensory and thermoregulatory responses to microwave irradiation / D.W. Blick [et al.] // Abstr. 67th Annu. Sci. Meet. Aerospace Med. Assoc., Atlanta, Ga, May 5–9 1996. – 1996. – V. 7. – P. 690.
2. Repacholi M.H. Low-level exposure to radiofrequency electromagnetic fields: health effects and research needs. // Bioelectromagnetics. – 1998. – № 19(1). – P. 1–19.
3. Использование метода миллиметровой терапии в лечении заболеваний щитовидной железы / А.И. Гуляев [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3 (24). – С. 35–43.
4. Применение новых рефлексотерапевтических методов на основе лечебно-диагностического комплекса «Шарм» при лечении больных с нарушением мозгового кровообращения / Н.Д. Девятков [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 8. – С. 5–13.
5. Использование терапевтического воздействия электромагнитных волн КВЧ-диапазона совместно с ГБО у больных с ДГПЖ и при ее сочетании с хроническим простатитом / О.Б. Лоран [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 8. – С. 13–16.
6. Влияние ЭМИ миллиметрового диапазона на течение ожоговой анемии / Н.П. Диденко [и др.] // VII Всесоюзный семинар «Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 19.
7. Влияние миллиметрового излучения низкой интенсивности на репуляционный потенциал стволовых кроветворных клеток / Л.П. Игнашева [и др.] // VII Всесоюзный семинар «Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 59.
8. Влияние электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона на систему крови животных в зависимости от их исходного состояния и зоны облучения / Н.П. Диденко [и др.] // Биофизика. – 1986. – Т. 31 (3). – С. 882–850.
9. Возможность прогнозирования и контроля стимулирующего эффекта электромагнитного излучения на эритропоэз у аутобредных белых мышей / Н.П. Диденко [и др.] – НИИЯФ ТПУ. – Томск, 1985. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 26.11.85 № 8154-В-85.
10. Стимуляция эритропоэза при постгеморрагической анемии у мышей под влиянием СВЧ-излучения / Н.П. Диденко [и др.]. – НИИЯФ ТПУ. – Томск, 1985. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 26.11.85, № 8155-В-85.
11. Головачева. Изменение иммунной системы при КВЧ-терапии у больных острым инфарктом миокарда / Головачева, В.Ю. Ушаков, В.М. Павлюк // VII Всесоюзный семинар «Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989 г. – М., 1989. – С. 15.

12. Природные антиоксиданты и клеточный иммунитет в условиях ионизирующих и неионизирующих излучений / В.Р. Макара [и др.] // II Откр. гор. науч. конф. мол. ученых г. Пущино, 1997 г. – Пущино, 1997. – С. 107–108.
13. Тимофеева Е.С. Эффективность применения миллиметровой терапии совместно с лекарственными препаратами у больных язвенной болезнью // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 3. – С. 91–93.
14. Брискин Б.С. К вопросу КВЧ-терапии осложненных гастродуоденальных язв / Б.С. Брискин, В.Н. Букатко, А.Н. Никитин // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 7. – С. 26–30.
15. Чиж А.Г., Осадчук М.А. Некоторые патогенетические аспекты применения электромагнитного излучения миллиметрового диапазона в комплексной терапии больных язвенной болезнью двенадцатиперстной кишки // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2000. – № 1 (17). – С. 34–38.
16. Родштат И.В. Лечебные эффекты плацебо и объективные критерии целительства // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3 (24). – С. 16–23.
17. Каменев Ю.Ф. Применение электромагнитного излучения в травматологии и ортопедии // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1999. – № 2 (14). – С. 20–24.
18. Обоснование применения КВЧ-излучения для стабилизации дегенеративно-дистрофических изменений в суставном хряще при деформирующем остеоартрозе / Ю.Ф. Каменев [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 7. – С. 30–35.
19. Aaron R.K., Ciombor D.M. Therapeutic effects of electromagnetic fields in the stimulation of connective tissue repair // J Cell Biochem. – 1993. – V. 52(1). – P. 42–46.
20. Otter M.W. Effects of electromagnetic fields in experimental fracture repair / M.W. Otter, K.J. McLeod, C.T. Rubin // Clin. Orthop. – 1998. – (355 Suppl). – S90-10. – P. 14.
21. Trock D.H. Electromagnetic fields and magnets. Investigational treatment for musculoskeletal disorders // Rheum Dis. Clin. North Am. – 2000. – V. 26(1). – P. 51–62.
22. Изменение показателей гемодинамики и сократительной функции миокарда у больных ИБС при воздействии КВЧ / Н.Д. Девятков [и др.] // VII Всесоюзный семинар «Применение КВЧ-излучения низкой интенсивности в биологии и медицине». Москва, 1989. – М., 1989. – С. 14.
23. Резонансы органов человека в КВЧ-диапазоне с позиций метода Р. Фолля / И.Л. Брандт [и др.] // XI Российский симпозиум с международным участием «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 21–24 апреля 1997 г. – М., 1997. – Т. 1. – С. 100–101.

## **5. ЗАВИСИМОСТЬ ВЛИЯНИЯ ЭМИ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОРГАНИЗМ ОТ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ ЕГО ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Рассмотренные в предыдущих главах особенности воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты различного уровня организации свидетельствуют о многофакторности и различной направленности эффектов электромагнитного поля. С другой стороны, результаты многочисленных наблюдений показывают, что СВЧ-излучение, особенно низкой интенсивности, не обладает свойством «навязывать» определенный качественный и количественный тип ответной реакции соответствующих функциональных систем, а лишь способно вызывать «отклик», зависимый как от исходного состояния этих систем, так и от организма в целом. Поэтому в данной главе рассматривается роль исходного состояния и асимметрии организма в формировании отклика на электромагнитное воздействие. Параграф 5.1 посвящен обзору работ, в которых изучается зависимость реакции организма на электромагнитное излучение от исходного состояния его физиологических систем. В § 5.2 рассмотрено влияние асимметрии систем организма, представленных парными органами, на формирование отклика на облучение электромагнитными волнами. Наконец, в § 5.3 обсуждается возможность прогнозирования биологических эффектов электромагнитного излучения.

## 5.1. Роль исходного уровня активности физиологических систем

Тезис о том, что результат действия электромагнитного излучения на уровне целого организма в значительной мере зависит от физиологического состояния «отвечающих» систем, подтверждается результатами ряда исследований. Если бы реакция функциональной системы не зависела от ее исходного состояния, то облучение должно было бы вызывать у всех животных одинаковые изменения в рецепторном аппарате кожи, должны были бы возбуждаться однотипные афферентные сигналы, а «отвечающие» системы получать одинаковые регулирующие эфферентные сигналы. В результате следовало бы ожидать одинаковой реакции на воздействие. Но, по данным исследований, на облучение электромагнитными волнами отвечает лишь часть животных.

Так, было обнаружено [1], что облучение беспородных мышей в течение часа электромагнитным излучением с длиной волны 7,09...7,20 мм и плотностью потока падающей мощности не более 10 мВт/см<sup>2</sup> вызывало неодинаковые изменения эритроидного роста костномозгового кроветворения у экспериментальных животных. Через трое суток регистрировалась местная стимуляция эритроидного роста только у животных с исходно невысоким количеством лейкоцитов (меньше  $12 \cdot 10^9$  л<sup>-1</sup>) или у мышей с большим процентом лимфоцитов в периферической крови. У мышей с изначально высоким лейкоцитозом изменения эритроидного роста не наблюдались. Авторы полагают, что возможно обсуждать роль исходного состояния адаптивной (нейроэндокринной) системы в реакции эритроидного роста на электромагнитное излучение, поскольку количество лимфоцитов в периферической крови отражает степень глюкокортикоидной активности.

Значение исходного уровня активации эритроидного роста было изучено в отдельном эксперименте [2]. В зависимости от исходного состояния, мыши линии СВА были разделены на две группы с количеством эритроцитов меньше и больше  $8 \cdot 10^{12}$  л<sup>-1</sup> («низкоэритроцитарные» и «высокоэритроцитарные» животные), облучение проводилось электромагнитными волнами с частотой в диапазоне 42,10...42,35 ГГц при плотности потока падающей мощности около 10 мВт/см<sup>2</sup>. Основным выводом авторов — возможно вызвать стимуляцию эритропоэза в определенных участках костномозговой системы в обеих группах животных при условии, что «низкоэритроцитарным» животным облучают левую заднюю конечность, а «высокоэритроцитарным» — правую.

Для уточнения результатов вышеприведенных исследований было

проведено сравнительное изучение кроветворения у мышей линий СВА и С57BL/10, различающихся содержанием лейкоцитов в периферической крови почти в 2 раза [3]. Одновременный учет исходного уровня как лейкоцитов, так и эритроцитов периферической крови позволил авторам показать, что у мышей с исходным количеством лейкоцитов менее  $12 \cdot 10^9 \text{ л}^{-1}$  и эритроцитов —  $8 \cdot 10^{12} \text{ л}^{-1}$  происходило изменение эритропоэза в костном мозге левой бедренной кости и грудины. У остальных животных отмечалась стимуляция эритропоэза в костном мозге правой бедренной кости.

Несмотря на крайне малочисленные исследования значимости исходного состояния организма в целом и его отдельных функциональных систем в развитии реакции на облучение электромагнитным излучением, следует отметить важность и необходимость учета этого фактора при изучении патогенных и лечебных эффектов излучения.

## **5.2. Значение функциональной асимметрии систем, представленных парными органами**

Слабое воздействие, каковым является низкоинтенсивное электромагнитное излучение, по своей силе мало отличается от влияния условий проведения эксперимента. В связи с этим, для различения собственных эффектов электромагнитного излучения от ответных реакций организма на сопутствующие условия воздействия, важно учитывать тонкие закономерности функционирования «отвечающих» физиологических систем. Одной из особенностей систем, представленных парными органами, является их функциональная асимметрия.

Важная роль исходной функциональной асимметрии (как и исходного состояния) показана в ряде исследований [4–6]. Авторами изучена реакция тимико-адреналовой системы мышей на воздействие электромагнитного излучения с длиной волны 7,1 мм, мощностью излучения менее  $10 \text{ мВт/см}^2$ . Для исключения влияния условий проведения эксперимента состояние изучаемых систем у животных экспериментальной группы сравнивалось с фоновой группой интактных мышей и с животными контрольной группы, которые в течение часа находились в камере для облучения. Изменения обнаружены сразу после часового

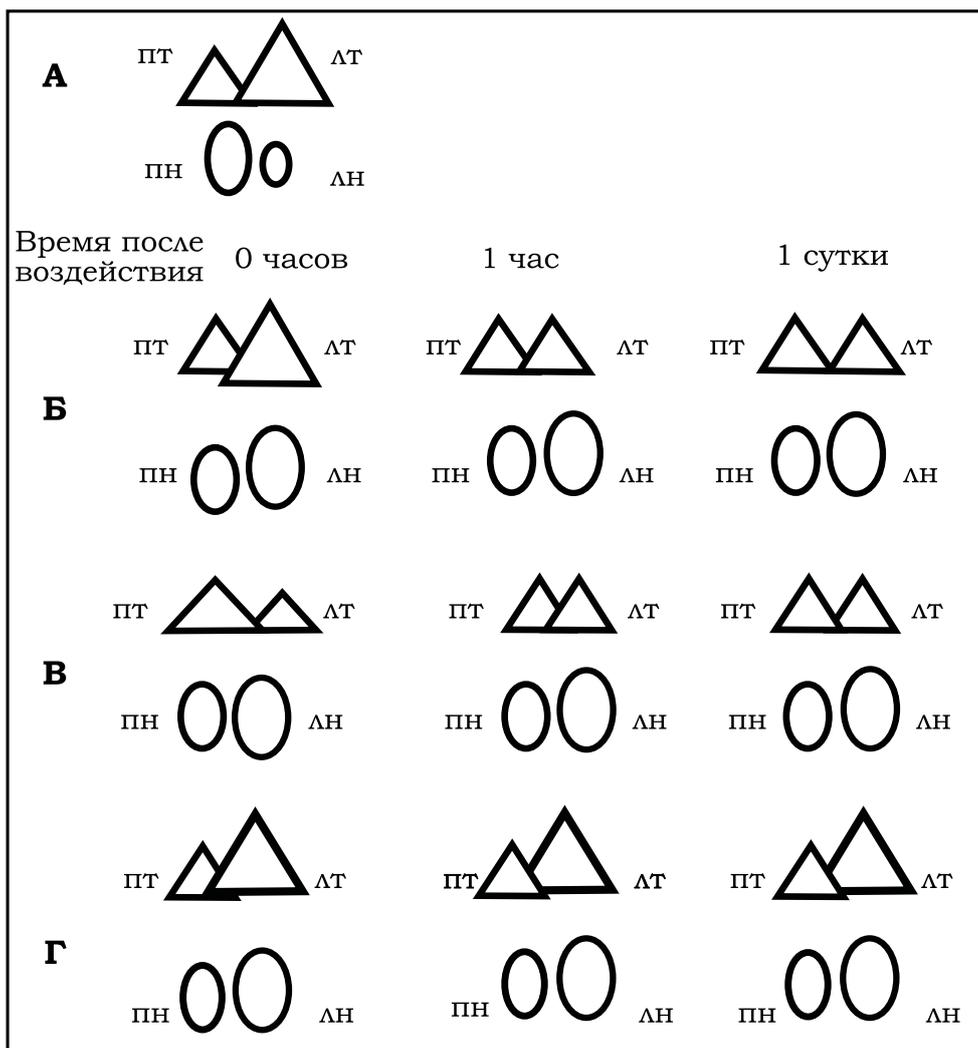
воздействия. Изоляция животных в камере для облучения (контроль) явилась стрессорным воздействием. Об этом свидетельствует гипертрофия клеток пучковой зоны надпочечников. При этом большей степени гипертрофии подвергся исходно менее активированный левый надпочечник. За счет этого изменился знак асимметрии. Несмотря на гипертрофию клеток пучковой зоны, инволютивные изменения тимусов были мало выраженными.

Через 1 ч гипертрофия адренокортикоцитов сохранялась, и на этом фоне произошло уменьшение общего количества тимоцитов в левом тимусе. Через сутки отмечена нормализация объема адренокортикоцитов пучковой зоны. Более того, в сравнении с достаточно активированным фоном произошло уменьшение активности адренокортикоцитов правого надпочечника. Благодаря этому, как и в предыдущие сроки, сохраняется знак коэффициента асимметрии. В обоих тимусах отмечено увеличение удельной клеточности.

Облучение кожи левого бедра мыши сразу после часового воздействия обусловило такие же изменения адренокортикоцитов, как и в контрольной группе. Однако инволютивные изменения оказались более выраженными в левом тимусе. Через один час и сутки изменения адренокортикоцитов и тимуса почти не отличались от контрольных.

Облучение области правого бедра оказалось менее выраженным стрессорным воздействием, поскольку, несмотря на гиперфункцию адренокортикоцитов пучковой зоны, во все сроки наблюдения не происходило инволюции тимусов. Если при облучении слева инволютивные изменения левого тимуса, наблюдавшиеся у животных контрольной группы несколько увеличивались и происходили ранее, то облучение справа отменяло их. Результаты измерений, сделанных в процессе изучения влияния асимметрии тимико-адреналовой системы на отклик организма на электромагнитное воздействие, схематично показаны на рис. 5.1.

Таким образом, в условиях изоляции животных в камере и воздействия электромагнитного излучения происходила активация адренокортикоцитов пучковой зоны, больше в левом надпочечнике. Инволютивные изменения происходили только в левом тимусе. Закономерно инволюция левого тимуса, приводящая к доминированию правого тимуса, сочеталась с правосторонней асимметрией активности пучковой зоны независимо от абсолютных значений активности правого и левого надпочечников. Облучение левого бедра усугубляет стрессорное действие камеры (инволюция левого тимуса). Облучение правого бедра, наоборот, смягчает стрессорное действие камеры.



*Рис. 5.1. Зависимость реакции тимуса и надпочечников от исходной функциональной асимметрии тимико-адреналовой системы и стороны воздействия: А – «фон»; Б – «контроль»; В – облучение левого бедра; Г – облучение правого бедра; «пт» и «лт» – правый и левый тимус; «пн» и «лн» – правый и левый надпочечник*

Учет функциональной асимметрии изучаемой тимико-адреналовой системы позволил авторам правильно интерпретировать полученные результаты, избегая неверных выводов как об отсутствии эффекта электромагнитного излучения (если бы случайно исследовались только правый тимус или только облучение справа), так и ошибочного отнесения эффектов условий эксперимента к действию электромагнитных волн.

### 5.3. Прогнозирование биологических эффектов ЭМИ СВЧ-диапазона

Анализ литературных данных показывает, что при изучении биологического действия СВЧ-излучения, как правило, не делается акцента на вариабильности проявления ответной реакции у особей, подвергнутых воздействию. Без исследований подобного рода невозможно прогнозировать последствия воздействия электромагнитным излучением, определить показания и противопоказания к их применению. В связи с этим становится понятной крайняя малочисленность попыток целенаправленной индивидуальной коррекции состояния отдельных функциональных систем.

В одном из подобных исследований [7] после воспроизведения постгеморрагической анемии (на 30...40 % от исходного уровня) животным без учета исходного состояния дважды по одному часу облучали левую заднюю конечность. Частота излучения равнялась  $(42,25 + 0,1)$  ГГц, плотность потока падающей мощности была равна не более  $10 \text{ мВт/см}^2$ . Воздействие оказалось неэффективным, так как отмечено лишь незначительное увеличение числа ретикулоцитов в периферической крови. В следующей серии наблюдений животных с постгеморрагической анемией подвергали воздействию ЭМИ с теми же параметрами с учетом исходного (до анемизации) состояния эритроидного ростка. У мышей с исходным количеством эритроцитов меньше  $8 \cdot 10^{12} \text{ л}^{-1}$  облучали левую заднюю конечность, при количестве эритроцитов, превышающем данный уровень, – правую. Подобный подход оказался эффективным. Это проявилось в достоверном увеличении концентрации гемоглобина и более выраженном, чем в первой серии, увеличении количества ретикулоцитов у животных обеих групп. Кроме этого, почти в 3,5 раза снизилось содержание метгемоглобина, что свидетельствовало о более оптимальном течении окислительно-восстановительных процессов в эритроцитах при воздействии СВЧ-излучения.

В качестве другого примера, основанного на умении прогнозировать эффекты, можно привести попытку использования СВЧ-излучения с целью смягчения проявлений лучевой болезни при облучении животных нейтронами [8]. Животных облучали потоком быстрых нейтронов в дозах 4,0; 5,25; 6,5; 7,75; и 9,0 Гр на циклотроне У-120 НИИ ядерной физики (г. Томск), при этом средняя энергия нейтронов в воздухе составляла 6 МэВ. Мышей экспериментальной группы за 50 мин до облучения нейтронами обрабатывали электромагнитным излучением нетепловой интенсивности определенной частоты (не указано). Ме-

сто облучения электромагнитными волнами выбирали таким образом, чтобы усилить стрессорную реакцию в первые сутки после воздействия. Длительность наблюдения – 30 суток. Результаты свидетельствовали, что подбор индивидуального режима протективного (защитного) воздействия электромагнитным излучением увеличил резистентность животных к облучению нейтронами на 70 % (фактор изменения дозы – 1,7). При этом изменялся спектр лучевых осложнений у погибших животных.

Приведенные результаты свидетельствуют о перспективности исследований с целью отработки индивидуальных режимов воздействия электромагнитным излучением сантиметрового и миллиметрового диапазонов, способных вызывать необходимые положительные эффекты. В частности, с учетом индивидуальных особенностей оператора (исходного состояния его важнейших функциональных систем, включая проявления функциональной асимметрии парных органов), варьируя место воздействия, возможно с помощью низкоинтенсивного электромагнитного излучения определенной частоты так «настроить» функциональные параметры организма, чтобы минимизировать отрицательные последствия внешних факторов, в том числе и электромагнитное излучение с неблагоприятными параметрами, приводящее к патогенным эффектам.

### *Список литературы к главе*

1. Возможность прогнозирования и контроля стимулирующего эффекта электромагнитного излучения на эритропоэз у аутбредных белых мышей / Н.П. Диденко [и др.]. – НИИЯФ ТПУ. – Томск, 1985. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 26.11.85, № 8154-В-85.
2. Зависимость характера реакции эритроидной и лимфоидной систем от их исходного состояния при воздействии электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона / Н.П. Диденко [и др.] // Применение миллиметрового излучения низкой интенсивности в биологии и медицине. – М., 1985. – С. 108–116.
3. Влияние электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона на систему крови животных в зависимости от из исходного состояния и зоны облучения / Н.П. Диденко [и др.] // Биофизика. – 1986. – Т. 31 (5). – С. 882–885.
4. Перельмутер В.М. Отражение функциональной асимметрии тимико-адреналовой системы в состоянии сетчатой зоны надпочечников при

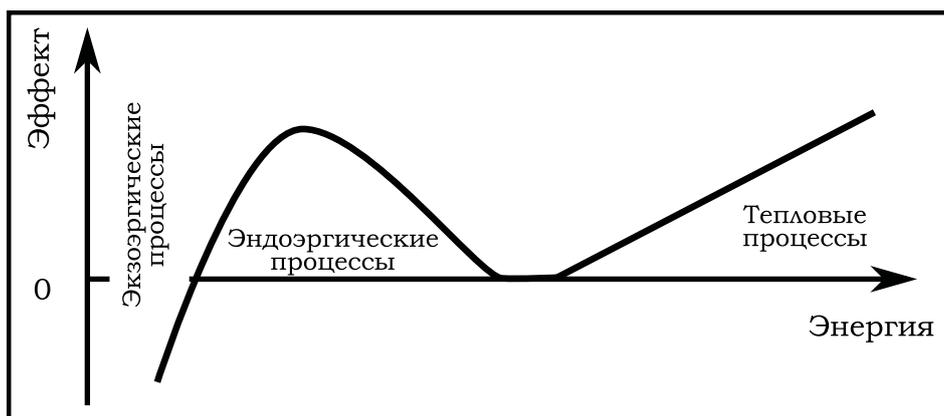
- гомотрансплантации правой или левой половины тимуса // Бюлл. экпер. биол. и мед. – 1997. – № 11. – С. 577–579.
5. Асимметрия реакций адаптивной системы на КВЧ-излучение / В.М. Перельмутер [и др.]. – Томск, 1993. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 01.07.93, № 1825-В 93.
  6. Динамика ранних морфофункциональных изменений надпочечников при воздействии КВЧ-излучения / Ю.В. Падеров [и др.]. – Томск, 1993. – 7 с. – Деп. в ВИНТИ 01.07.93, № 1817-В 93.
  7. Стимуляция эритропоэза при постгеморрагической анемии у мышей под влиянием СВЧ-излучения / Н.П. Диденко [и др.]. – НИИЯФ ТПУ. – Томск, 1985. – 9 с. – Деп. в ВИНТИ 26.11.85, № 8155-В-85.
  8. Влияние электромагнитного излучения миллиметрового диапазона на выживаемость животных при облучении нейтронами / Н.П. Диденко [и др.] // Медикобиологические аспекты миллиметрового излучения. – М., 1987. – С. 74–78.

## **6. МЕХАНИЗМЫ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА**

Рассмотренные в предыдущих главах особенности биологических эффектов электромагнитного излучения показали, что даже низкоинтенсивные поля могут привести к значительным изменениям биологических процессов и, за счет этого, к изменению состояния организма. При этом, как было отмечено в § 0.1, принципиальным является тот факт, что воздействие осуществляется излучением, энергия кванта которого много меньше  $kT$ . Поэтому важно различать тепловые эффекты воздействия от нетепловых — эти вопросы рассмотрены в § 6.1 и 6.2. Рецепция электромагнитного излучения, происходящая на клеточном уровне, находит свое отражение в изменении функционирования нервной системы человека. Механизмы непосредственной реакции целого организма на воздействие СВЧ-излучения рассмотрены в § 6.3. Напрямую с реакцией нервной системы связан вопрос о сенсорном восприятии воздействующих электромагнитных волн. В § 6.4 рассмотрены возможные сенсорные системы млекопитающих.

### **6.1. Физические механизмы воздействия излучения теплового уровня**

В основе воздействия электромагнитного излучения на биологические объекты лежит его поглощение этими объектами. Другими словами, воздействие носит энергетический характер. Это утверждение не противоречит даже гипотезе «информационного» воздействия миллиметровых волн низкой интенсивности [1], поскольку и информационный сигнал должен принести с собой определенную энергию, чтобы вызвать отклик в приемнике. С термодинамической точки зрения поглощению энергии в биологической системе соответствуют две отдельные области проявления эффекта [2], которые показаны на рис. 6.1.



*Рис. 6.1. Соотношение изотермических и тепловых биологических эффектов электромагнитного излучения*

В левой части рисунка показана область биоэффектов, когда поглощенная энергия внешнего электромагнитного излучения приводит к синхронизации внутренних колебаний, обуславливая нетепловые (изотермические) эндоэргические процессы в биологических системах. Здесь уместна аналогия с электронно-волновыми СВЧ-усилителями, когда относительно слабый входной сигнал, воздействуя в резонансной полосе частот, приводит к самоорганизации энергетически несравнимо более сильной внутренней среды прибора, в результате чего на выходе появляется мощный сигнал. В каком-то смысле такое воздействие можно считать «информационным», поскольку слабый воздействующий сигнал вызывает переход системы в новое состояние, энергии на который недостаточно во внешнем сигнале, но она имеется в самой системе. Обзор механизмов такого взаимодействия приведен в следующем параграфе, а в этом рассмотрим только тепловое воздействие электромагнитного излучения, область которого показана на рис. 6.1 в правой части.

Поглощение энергии электромагнитных волн в биологических тканях происходит за счет электрической компоненты электромагнитного поля. На низких частотах потери энергии электромагнитного поля обусловлены, в основном, ионными токами, а в диапазоне СВЧ преобладающим механизмом являются потери за счет поляризации вещества. Электронная и ионная поляризации имеют времена релаксации  $10^{-16} \dots 10^{-14}$  и  $10^{-14} \dots 10^{-12}$  с, соответственно. Поэтому в интересующем нас диапазоне частот имеет смысл рассматривать только дипольную поляризацию, у которой времена релаксации сравнимы с периодом колебаний воздействующих электромагнитных волн.

В биологических тканях основным партнером во взаимодействии с электромагнитным излучением в диапазоне сантиметровых и милли-

метровых волн является вода. Во-первых, молекулы воды в свободном состоянии имеют значительный дипольный момент. Во-вторых, время релаксации этой молекулы при температуре тела составляет  $\sim 6 \cdot 10^{-12}$  с. В-третьих, вода является основным компонентом биологических тканей. Живые организмы содержат от 65 до 98 % воды. Ткани и органы человека имеют большое содержание воды. К примеру, мозг содержит около 70 % воды, кровь – 83 %, легкие и сердце – около 79 %, печень – 69 %, мышцы – 75 %, кожа – 72 % и т. д.

Вода является сложным физическим объектом, содержащим, наряду со свободными молекулами воды, и гексагональные кластеры. Потери энергии электромагнитных волн СВЧ-диапазона связаны, в основном, с дипольной поляризацией свободных молекул воды, поскольку в гексагональных кластерах дипольные моменты молекул воды, входящих в кластеры, уравновешены. С увеличением температуры количество свободных молекул возрастает за счет распада кластеров. Соответственно, растут удельные потери.

Частотная зависимость диэлектрической проницаемости, как известно, описывается формулой Дебая:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\infty}}{1 + i\omega\tau}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – частота внешнего электромагнитного поля;  $i$  – мнимая единица;  $\tau$  – время релаксации;  $\varepsilon_{\infty} = 4 \dots 5$  – диэлектрическая проницаемость в пределе высоких частот. Вода в биологических тканях находится в виде растворов, где ее молекулы имеют водородные связи с другими молекулами. Поскольку время релаксации несколько изменится, то вместо одного времени релаксации в выражение (1) необходимо подставить функцию распределения времен релаксации  $G(\tau)$ . Тогда потери энергии электромагнитных волн в биологических тканях будут определяться мнимой частью выражения (1):

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} \int_0^{\infty} \frac{G(\tau)\omega\tau d\tau}{1 + \omega^2\tau^2}.$$

Зависимость потерь за счет поляризации молекул воды будет иметь вид, показанный на рис. 6.2. Согласно рисунку, в интересующем нас диапазоне, и особенно в области высоких частот, поглощение энергии электромагнитных волн в водной компоненте биологических тканей близко к максимуму. При достаточно высоком уровне мощности электромагнитного излучения будет происходить быстрый нагрев биотка-

ней, в первую очередь водной компоненты. Это может привести к изменению структуры воды, модификации связей ее молекул с белковыми молекулами и, за счет этого, функциональной активности ферментов, что повлечет изменения метаболических процессов в клетках. В пределе нагрев может привести к денатурации белков, то есть к полной утере ими функциональных свойств. Даже частичная потеря функциональных свойств белков ведет к гибели клетки. Это обстоятельство используется в диатермическом методе лечения рака, когда СВЧ-нагрев приводит к гибели опухолевых клеток. Тепловые эффекты электромагнитного излучения опасны для всех систем организма, но наиболее чувствительны к ним половая система, глаза, свертывающая система крови.

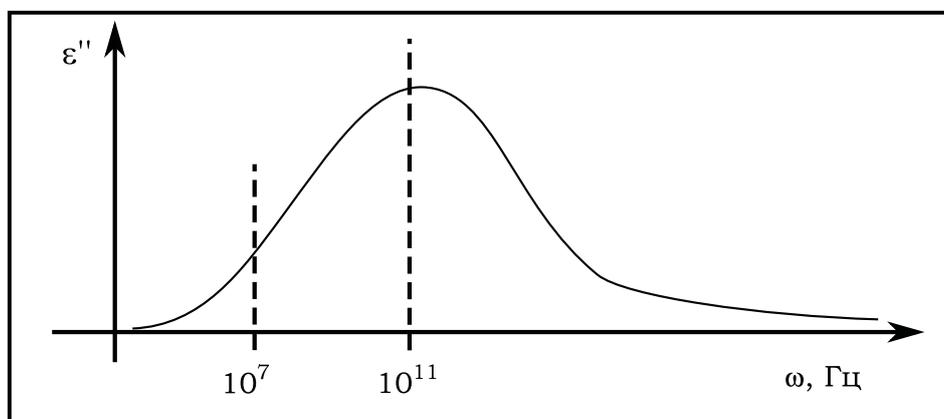


Рис. 6.2. Зависимость потерь в биологических тканях от частоты

## 6.2. Вероятные физические механизмы воздействия излучения нетеплового уровня

Как упоминалось ранее, основной физической проблемой взаимодействия электромагнитного излучения с биологическими объектами при нетепловом уровне мощности является механизм накопления энергии для возможных структурных переходов в биологических структурах, влекущих изменение их функциональной активности. Было показано, что такое накопление может осуществляться в механических колебаниях биомолекул. Для понимания механизма физической рецепции электромагнитного излучения важно найти первичные физические объекты в биологических тканях, взаимодействующие с электромагнитными волнами.

Непосредственным объектом при воздействии электромагнитного излучения являются электрические заряды (электроны и ионы) и диполи, представленные либо молекулами, либо отдельными группами макромолекул, имеющие механические степени свободы. Одним из главных претендентов на роль такого физического рецептора, непосредственно взаимодействующего с электромагнитным излучением, является молекула воды, имеющая большой дипольный момент ( $\sim 1,8D$ ). Спектр частот вращательных и либрационных движений молекул воды находится в области сантиметрового и миллиметрового диапазонов. При этом динамическое состояние водных органических и неорганических систем зависит от воздействия различных электролитов и неэлектролитов, что проявляется в изменении ее СВЧ- и миллиметровых спектров [3]. Следовательно, значения частот, на которых может происходить взаимодействие электромагнитных волн с молекулами воды в биологических тканях, зависят от конкретного состава жидкой фазы биологических тканей. Сама вода как химический реагент может менять свою активность под действием электромагнитных волн [3]. Измененная под действием электромагнитного излучения активность воды может приводить к изменению гидратации белковых молекул, а от степени гидратации белковых молекул сильно зависит и их физиологической активности [5] (рис. 6.3).

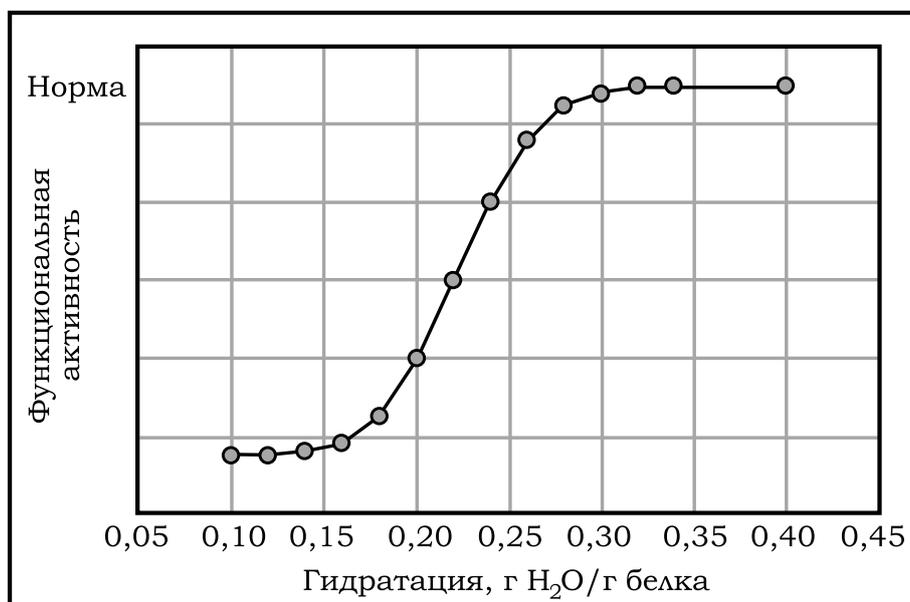


Рис. 6.3. Зависимость функциональной активности белковых молекул от степени их гидратации

Гидратация белковых молекул может измениться не только за счет модификации химической активности воды в среде, окружающей гидратную оболочку белковой молекулы, но и за счет непосредственного взаимодействия излучения с молекулами воды в этой гидратной оболочке. Энергия электромагнитных волн преобразуется в кинетическую энергию поступательного или вращательного движения молекул. Энергия движений свободных молекул воды диссипирует в тепло за время  $10^{-10} \dots 10^{-9}$  с, но, тем не менее, и при таких значениях диссипации эти движения могут изменить степень гидратации белковых молекул [6].

Тогда механизм первичной рецепции электромагнитного излучения биологическими объектами за счет взаимодействия с молекулами воды выглядит следующим образом [6]. Электромагнитные волны активируют определенные степени свободы молекул воды в жидкой фазе биологических тканей. При этом за счет повышения активности воды увеличивается обмен между средой и гидратными оболочками биомолекул. Вследствие этого стимулируется химическая активность макромолекулярных (преимущественно мембранных) структур, что ведет к модуляции функциональных свойств ферментных, транспортных и рецепторных белков, а это уже влияет на процессы метаболизма клеток. Связанные молекулы воды осуществляют под действием электромагнитных волн качательные движения и могут служить преобразователями электромагнитных колебаний в механические, энергия которых передается биологическим структурам.

Взаимодействие электромагнитных волн с водой может происходить не только на уровне отдельных молекул, но и с водными кластерами. В статье В.И. Петросяна и др.[7] исследовались физические резонансы взаимодействия электромагнитного поля СВЧ-диапазона (4...120 ГГц) с биологическими объектами и водой. Наличие резонанса фиксировалось по увеличению шумовой энергии собственного излучения облучаемого объекта вследствие диссипации энергии волны накачки. Результаты показали наличие таких резонансов и тождественность резонансных частот для воды, тканей организма человека и животных. Это, по мнению авторов, указывает на единую физическую природу взаимодействия электромагнитного излучения с биообъектами, связанную с молекулярной водной структурой. Электромагнитные волны в диапазоне 30...100 ГГц могут резонансно взаимодействовать с молекулами воды, находящимися в кластерах с гексагональной структурой и совершающими вибрационные (угловые) колебания в радиальном и аксиальном направлениях [8]. При совпадении частоты электромаг-

нитной волны с частотой собственных колебаний кластеров воды волна может распространиться глубоко в ткани. При воздействии на молекулярные кластеры воды, частоты которых близки к резонансным, внешнее электромагнитное поле может приводить к смещению частот собственных колебаний к значению воздействующих, синхронизируя их и влияя посредством этого на состояние биологических структур, что может обусловить биологический эффект.

Предложен также механизм, когда структура и свойства воды меняются электромагнитным излучением опосредованно, за счет взаимодействия с биомолекулой. В качестве одного из таких рецепторов может служить молекула циклического аденозинмонофосфата. А.П. Жуковский и др. [9] считают это возможным, поскольку: 1) она присутствует почти во всех клетках; 2) спектры вращательных движений этой молекулы лежат в области КВЧ-диапазона; 3) время объемной релаксации при вращательном переходе этой молекулы в воде под действием электромагнитных волн сравнимо с изменением величины периода вращения и много меньше самого периода вращения, что обеспечивает эффективную передачу возбуждения молекулам воды, находящимся вокруг молекулы циклического аденозинмонофосфата как в свободном состоянии, так и в кластерах. Возмущения структуры воды проявляются в ее взаимодействии с биообъектами внутри клетки, модифицируя метаболические процессы [10].

Взаимодействующие с электромагнитным излучением биомолекулы могут не только служить приемниками электромагнитных волн и передатчиками физического воздействия другим биологическим структурам, но и сами откликаться на воздействие структурными перестройками и модификацией своей биологической функции. В первую очередь это относится к белковым молекулам. Возможность накопления энергии при взаимодействии с электромагнитным излучением и, вследствие этого, конформационных переходов подробно рассмотрены в § 1.1–1.3. В качестве примера таких перестроек структуры белковых молекул и изменения их функциональной активности можно привести результаты исследования зависимости содержания аденозинтрифосфата и электрофоретической подвижности эритроцитов крыс от длительности экспозиции животных в электромагнитном поле миллиметрового диапазона [11]. Было зафиксировано, что содержание аденозинтрифосфата возрастает на 37 % на 5 день облучения, а электрофоретическая подвижность эритроцитов увеличивается на 23 %. Изменения содержания аденозинтрифосфата можно объяснить модификацией про-

цессов гликолиза миллиметровыми волнами, т. е. изменением активности целого ряда ферментов. Изменения электрофоретической подвижности эритроцитов возможны за счет изменения распределения зарядов на поверхности мембран эритроцитов, что предполагает взаимодействие миллиметровых волн с рецепторами-молекулами в клеточной мембране.

Еще одним возможным механизмом рецепции электромагнитного излучения является возбуждение акустических волн в надмолекулярных структурах, в частности в мембранах [5]. При прохождении электромагнитных волн из воздуха в конденсированную среду с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  частота остается прежней, а длина волны уменьшается в  $\epsilon^{1/2}$  раз. Так, на частоте  $3 \cdot 10^{10}$  Гц диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  биологических тканей – 25, и длина волны составит 2 мм. Длина акустической волны примерно в  $10^5$  раз меньше. Поэтому биологические микрообъекты (макромолекулы, мембраны), участвующие в акустических колебаниях, будут находиться фактически в однородном электрическом поле, изменяющемся периодически во времени с частотой, близкой к собственной частоте биологических осцилляторов. Рассмотрим возможный механизм возникновения акустоэлектрических волн на мембране [12]. Представим клетку радиусом  $R$  с толщиной гидрофобной части мембраны  $\Delta_m$  (рис. 6.4).

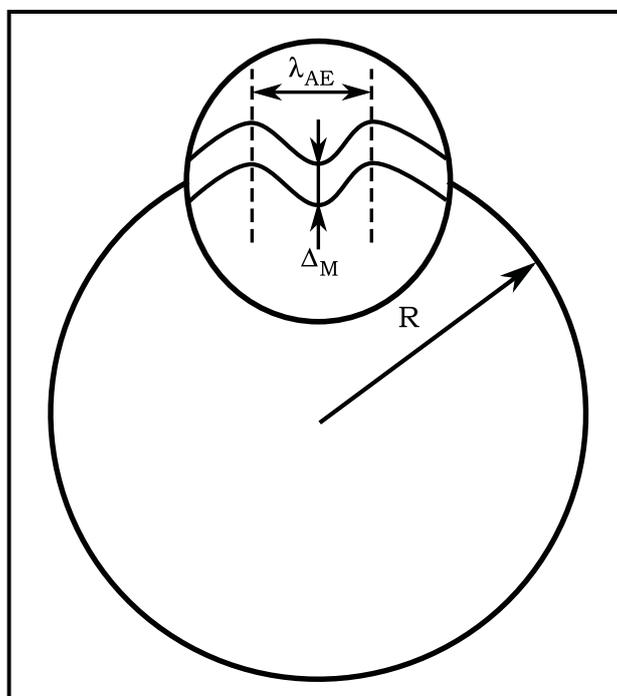


Рис. 6.4. Схема возбуждения акустоэлектрических волн в мембране

В однородном поле падающей на клетку электромагнитной волны возникают акустоэлектрическая волна на мембране за счет некоторого избыточного давления цитоплазмы внутри клетки и противоположно направленных сил взаимодействия зарядов на мембране с электрической компонентой электромагнитной волны. При этом частоты электромагнитной и акустоэлектрической волн  $\omega_{EM}$  и  $\omega_{AE}$  равны. Тогда длина акустоэлектрической волны  $\lambda_{AE}$  равна:

$$\lambda_{AE} = \lambda_{EM} n \frac{a}{c},$$

где  $n = 1,3$  – показатель преломления для биологических тканей,  $a = \sqrt{\frac{k}{\rho \Delta_m}}$ . Здесь  $k = 0,45$  Н/м – модуль упругости;  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup> –

плотность и  $\Delta_m = 3 \cdot 10^{-9}$  м – толщина гидрофобной части мембраны;  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света электромагнитной волны в вакууме. Отсюда  $\lambda_{AE} = 1,7...17$  нм при длине волны  $\lambda_{EM} = 1,10$  см. Если диаметр клетки  $0,5...10$  мкм, то на мембране укладывается, как минимум, 30 длин акустоэлектрической волны. Резонансная частота, при возбуждении на которой укладывается на мембране целое число колебаний акустоэлектрической волны, будет зависеть от размера мембраны и ее упругих свойств, в том числе и плотности белковых молекул на поверхности мембраны, и количества ионных каналов.

Идеологически такой подход восходит к известной работе Г. Фрелиха [13], где, исходя из общих биофизических соображений, была обоснована возможность существования в мембранах акусто-электрических колебаний, частота которых лежит в диапазоне  $10^{11}...10^{12}$  Гц. На основе этой идеи был развит «информационный» подход к биологическому действию низкоинтенсивных ЭМВ миллиметрового диапазона [1], согласно которому здоровые клетки имеют собственные акустоэлектрические колебания в мембранах. Роль этих колебаний, возможно, сводится к некоторому «массажу» мембраны, обеспечивая необходимую степень проницаемости транспортных каналов. При каких-либо нарушениях в процессе жизнедеятельности клетки эти колебания изменяют амплитуду или частоту, что сказывается на проницаемости мембран. Внешнее электромагнитное воздействие на нормальной собственной частоте мембраны может синхронизировать колебания отдельных ее участков либо усилить затухающие колебания, приводя к желательной коррекции метаболизма клетки.

Помимо рецепции на уровне молекул и надмолекулярных структур биологический отклик на воздействие электромагнитного излучения может быть и за счет макроскопических эффектов. При облучении организма электромагнитными волнами возможна их интерференция на неоднородностях биофизических параметров тканей. При этом могут возникнуть температурные градиенты из-за разницы в поглощенной дозе на соседних участках тканей. При уровне падающей мощности до  $10^{-5}$  Вт/см<sup>2</sup> могут возникнуть градиенты до 5 град/мм [6]. Такие градиенты могут привести к изменению биохимических процессов, модифицировать прохождение нервных импульсов, и тем самым привести к появлению афферентных нервных и гуморальных сигналов.

Расположение локальных максимумов очень чувствительно к частоте падающей электромагнитной волны. Изменение частоты на 200 МГц в миллиметровом диапазоне может приводить к качественному изменению картины нагрева. Отклик на электромагнитное воздействие может носить острорезонансный характер, и «эквивалентная добротность» может достигать величины 500 и более [14]. Скорость нагрева в максимумах поля превышает среднюю на порядок и более, поэтому возможна неспецифическая сенсорная реакция организма, но это уже относится к физиологии. Физиологические аспекты рецепции электромагнитного излучения рассмотрены в следующем параграфе.

### **6.3. Физиологические механизмы рецепции ЭМИ на уровне целого организма**

Рассмотренные в предыдущем параграфе физические механизмы рецепции электромагнитного излучения дают понимание того, как под действием электромагнитных волн меняется функциональная активность биомакромолекул и надмолекулярных структур. Возникает вопрос, как проявляются эти изменения в физиологии организма, какие реакции вызывает в нем непосредственное воздействие низкоинтенсивного излучения. В этом параграфе сделан обзор результатов исследований на эту тему.

Н.Н. Лебедева [15] рассматривает различие между нейрофизиологическими механизмами биологических эффектов электромагнитных

полей инфранизких частот (ИНЧ,  $f=1...50$  Гц) и крайне высоких частот (КНЧ, 30...100 ГГц). Обнаруженные различия в ЭЭГ реакциях на поля ИНЧ и КВЧ сводятся к следующему. При действии ИНЧ изменения электрических процессов мозга возникают в переднецентральных областях, а также в теменной области контралатерального полушария (повышение по  $\Delta\tau$ -ритмам). А реакция на КВЧ-поле проявляется в увеличении мощности  $\alpha$ -ритма в затылочных областях. Эти результаты говорят о различии нейрофизиологических механизмов, обеспечивающих эти реакции: преимущественное участие специфической лемнисковой сенсорной системы в случае ИНЧ-полей и неспецифической, экстралемнисковой при действии КВЧ-излучения. Возможно, эти различия определяются физическими свойствами электромагнитных волн: поля ИНЧ проникают глубоко в ткани организма, вовлекая в реакцию сосудистую систему, мышечные волокна, действуя непосредственно на нервные волокна, а КВЧ-излучение практически полностью поглощается в коже, действуя только на неглубоко расположенные рецепторы, поэтому механизм действия в этом случае — рефлекторный.

Характер биоэлектрической активности неокортекса, возникающей после длительной экспозиции в КВЧ- и ИНЧ-полях, свидетельствует о развитии неспецифической реакции активации, т. е. о повышении тонуса коры головного мозга. Одним из физиологических механизмов, обеспечивающим воздействие миллиметровых волн, глубина проникновения которых в биоткани очень мала, на внутренние органы, может быть медиация с помощью лимфоцитов. И.В. Родштат [16] приводит данные по модуляции мозговых тканей КВЧ-излучением. Известно, что примерно 50 % лимфоцитов могут циркулировать из крови в лимфоидную ткань и обратно. Большинство рециркулирующих лимфоцитов содержатся в ретроахиллярных лимфатических узлах. Эти иммунокомпетентные клетки могут влиять на мозг за счет ингибиторного действия выделяемых ими растворимых медиаторов.

Действие миллиметровых волн на мозг человека и животных характеризуется асимметрией. Облучение левой половины тела адресуется преимущественно в правую гемисферу у человека, а у экспериментальных животных сопровождается увеличением популяции долгоживущих лимфоцитов в лимфоузлах облучаемой стороны [17]. Эффект же, наблюдаемый при облучении правой стороны тела, состоит в увеличении популяции короткоживущих лимфоцитов в лимфоидных органах, что объясняется более равномерной адресацией воздействия на оба полушария. Можно предположить, что при облучении левой поло-

вины тела КВЧ-модуляция активности мозга реализуется посредством нервных и гуморальных механизмов, причем нервный сигнал адресован главным образом в правую гемисферу, а гуморальный – в гипоталамус. Отклик же на облучение правой половины тела обусловлен, в основном, нервными механизмами, сигналы адресованы более равномерно в оба полушария.

Рассматривая физиологические механизмы рецепции электромагнитного излучения, нужно прежде всего определять первичные физиологические мишени, которые находятся в зоне действия электромагнитных волн. По-видимому, всю полосу частот могут принимать структуры, близкие к кожному покрову. Н.Н. Лебедева [18] называет пять первичных физиологических мишеней, попадающих в зону прямого действия электромагнитного излучения: 1) рецепторы центральной нервной системы (механорецепторы, свободные нервные окончания); 2) клетки диффузной нейроэндокринной системы, в частности тучные клетки и клетки Меркеля; 3) клетки иммунной системы – кожные депо Т-лимфоцитов; 4) микрокапиллярное русло кровеносной системы; 5) биологически активные точки (БАТ).

Эти пять первичных мишеней определяют участие соответствующих систем в реализации биологических эффектов электромагнитного излучения: после «запуска» этих систем начинается сложный процесс опосредованного действия на другие системы (кровеносную, гуморальную, вегетативную нервную) и внутренние органы. Особенности реакции на этом этапе определяются как характеристиками электромагнитного излучения и режимом облучения, так и исходным состоянием организма. Общее воздействие проявляется как реакция повышения неспецифической резистентности организма, что, в свою очередь, связано с антистрессорными реакциями высокого уровня реактивности [18].

При исследовании влияния низкоинтенсивного электромагнитного излучения миллиметрового диапазона длин волн (5,6 мм) на функциональное состояние коры головного мозга [19] были получены следующие данные.

1. Функциональное состояние коры головного мозга изменяется уже через 20 мс после начала электромагнитного облучения кожи в районе дистальной трети проекции грудины.
2. Процессы, развивающиеся под действием электромагнитного излучения КВЧ в неокортексе, в том числе и в первичной проекционной зоне зрительного анализатора, не только опережают, но и могут инвертировать знак начального коркового компонента зрительных, вызванных потенциалов, полученных в ответ на вспышку света, синхронизированную с началом электромагнитного облучения.

3. Необходимым условием проявления эффекта КВЧ-облучения является преимущественная синхронизация корковых потенциалов в одном из поддиапазонов (наибольшая эффективность на частоте 11 Гц)  $\alpha$ -ритма, при этом должна отсутствовать осознаваемая афферентация.

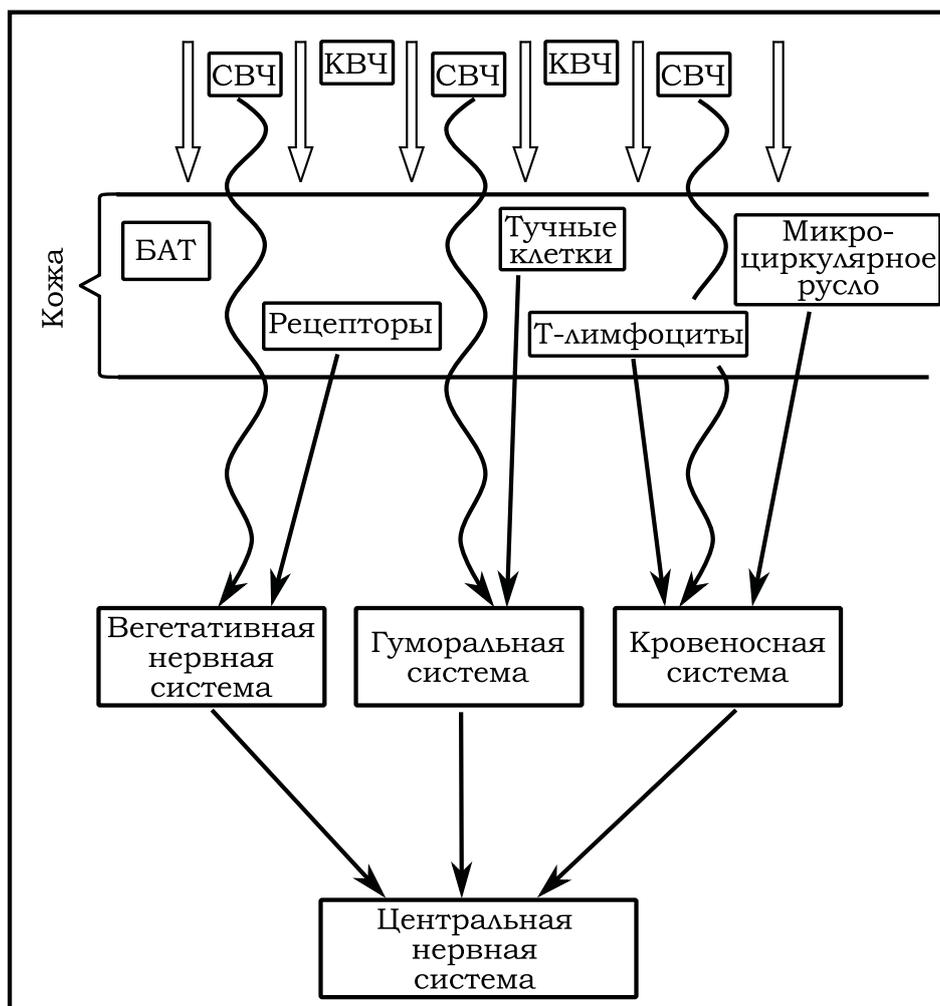


Рис. 6.5. Вероятные физиологические механизмы воздействия ЭМИ на ЦНС

В качестве наиболее реального механизма такой реакции коры головного мозга на электромагнитное воздействие А.А. Ковалев, О.В. Пресняков [19] предполагают модуляцию фоновой импульсной активности нейронов, имеющих в спинальных ганглиях, вызванную поглощением электромагнитных волн в рецепторах. При этом фоновая активность нейронов обуславливает постоянное распространение в сторону мозга (афферентацию) потенциалов по наиболее быстропроводящим возбуждение (группа  $A\alpha$ ) волокнам задних столбов спинного мозга и медиальной лемнисковой системы. Электромагнитное излу-

ние, влияя на кожные рецепторы, изменяет характер этих спонтанных, постоянно передающихся афферентных сигналов, переводя неокортекс в иное состояние, вследствие чего модифицируется реакция на одновременно воздействующие световые импульсы.

При исследовании сенсорных реакций на воздействие низкоинтенсивных электромагнитных волн миллиметрового диапазона [20] было обнаружено, что восприятие человеком такого воздействия зависит от индивидуальных особенностей человека. Хорошо чувствуют такие стимулы люди, у которых наибольшая мощность  $\alpha$ -ритмов ЭЭГ наблюдалась в области теменно-затылочных отведений. Они имели более низкий болевой порог к электротоку, у них был самый высокий показатель критической частоты слияния мельканий. Отмечено, что распознавание электромагнитного сигнала требовало достаточно много времени (более 400 мс). По-видимому, осознание значимости стимула и отнесение его к определенному классу объектов требует взаимодействия сенсорной и несенсорной систем с использованием понятийного аппарата. Сенсорные системы, позволяющие распознавать электромагнитное воздействие, рассмотрены в следующем параграфе.

#### **6.4. Сенсорные системы млекопитающих. Роль структурной организации кожи в рецепции ЭМИ**

Экспериментальные работы с использованием электромагнитного излучения широкого спектра частот показали, что даже при низкой интенсивности электромагнитных полей человек и животные чувствуют это воздействие. Имеются ли для этого специальные рецепторы? Если эти ощущения неспецифические, обусловленные только электромагнитными полями, то что представляют собой системы, «переводящие» электромагнитные воздействия на «язык» неспецифических ощущений? Рассмотрим это вопрос.

Исследования механизмов рецепции электромагнитного излучения активно проводятся начиная с 70-х гг. прошлого века, прежде всего, по специфическим рецепторам. Поскольку электромагнитное поле имеет и магнитную, и электрическую составляющие, то речь идет и о магнито-, и электрорецепции. Среди наиболее разрабатываемых на-

правлений, применимых для наземных млекопитающих, можно выделить два: прямую магниторецепцию, основанную на наличии в тканях частиц магнетита, и косвенную магниторецепцию, основанную на законе Фарадея и являющуюся практически электрорецепцией.

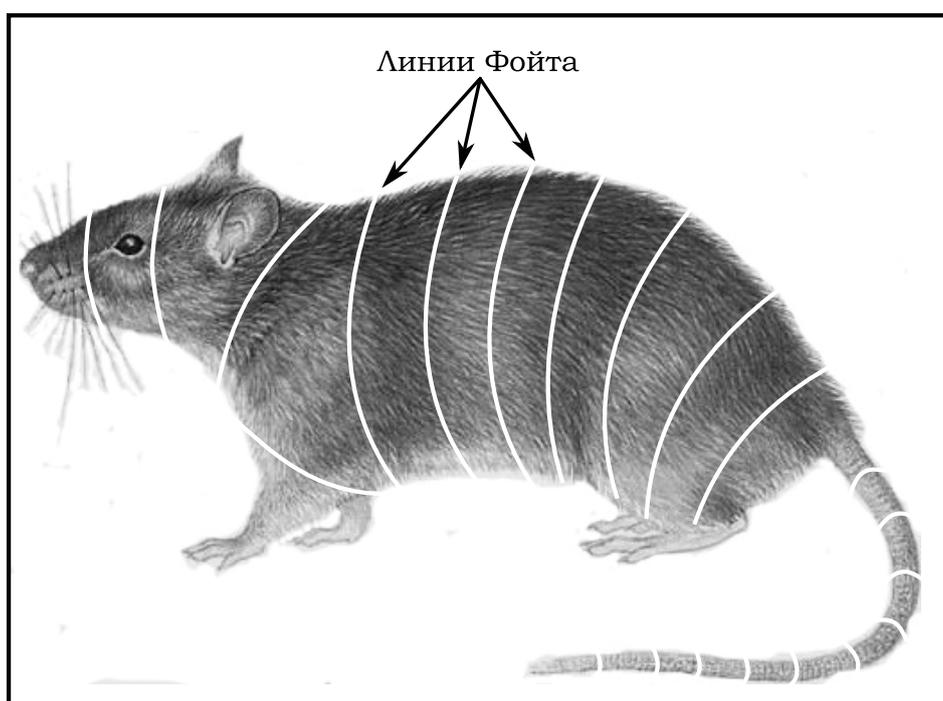
Выполненные в первом направлении работы Дж.Л. Киршвинка [21, 22] подтверждают, что все ткани и органы человека содержат частицы магнетита. Особенно много их обнаружено в тканях мозга [23], надпочечников и костной ткани клиновидно-решетчатого синуса [24]. Гипотеза, основанная на использовании магнетита для магниторецепции у животных, предполагает, что чувствительность к направлению поля можно объяснить наличием лишь нескольких образований, подобных магнитосоме, связанной с клетками волосков (как у железосодержащих бактерий). Однако структуры, которые могли бы отвечать за реализацию механизма рецепции с участием частиц магнетита, не были выявлены. Детальный механизм работы сенсорной системы на основе магнетита неизвестен.

Другим направлением возможной магниторецепции является косвенная магниторецепция, реализуемая, в частности, у пластинчатожаберных рыб. Она осуществима у наземных животных при выполнении ряда требований к возможному органу рецепции электромагнитного излучения [25]: орган должен быть подобен катушке, состоящей из одного или нескольких витков проводника, а размеры ее должны составлять не менее нескольких миллиметров. Структура, отвечающая этим требованиям, обнаружена у млекопитающих и представляет собой систему линий Фойта [26]. Система линии Фойта образована упорядоченно расположенными волосяными фолликулами, которые формируют систему линий, перпендикулярных продольной оси тела животного [27] (рис. 6.6).

Полученная картинка идеально соответствует соленоиду, витки которого образованы структурой кожи животного. В качестве «проводников» здесь выступают, с одной стороны, линии Фойта, состоящие из последовательно расположенных групп волосяных фолликулов с сетью опутывающих их капилляров, которые имеют большую проводимость по сравнению с соединительной тканью разделяющего линии Фойта пространства, играющей роль изоляции между витками соленоида.

Линии Фойта, образующие витки «соленоида», как предполагается, представляют физическую систему [28], которая может формировать сигнал, воспринимаемый организмом животного. Эта система может работать в очень широком диапазоне частот — от постоянных до крайне высоких (КВЧ) — по аналогии с системой связанных колебательных контуров. На низких частотах, в том числе и постоянном магнитном поле, при движении животного в линиях Фойта, как витках со-

леноида, будут наводиться электрические токи. А в случае КВЧ-полей, система линий выступает в роли дифракционной решетки, модулирующей пропускание волны в подкожные слои. На промежуточных частотах, в соответствии с многомодальностью частотной характеристики рассматриваемой колебательной системы («соленоид» – линии Фойта), могут возникать резонансы (моды колебаний). Наводимый сигнал на низких и инфранизких частотах может приводить к возникновению афферентного нервного импульса, а на высоких частотах вплоть до КВЧ медиация может осуществляться за счет эффектов воздействия электромагнитного излучения на молекулярном уровне.



*Рис. 6.6. Расположение линий Фойта на теле животного*

Экспериментальным подтверждением правильности этих рассуждений служат результаты, полученные при облучении мышей ЭМИ миллиметрового диапазона в области бедра [29]. Измерения характера поглощения КВЧ-колебаний в диапазоне частот от 41,0 до 43,0 ГГц как в коже интактных мышей, так и у животных со сформированным хирургическим путем кожным лоскутом показали, что существует прямолинейная зависимость уровня поглощения КВЧ-излучения от расстояния между соседними линиями Фойта. Эти результаты согласуются с гипотезой о том, что линии Фойта в данном диапазоне частот ЭМИ действуют как дифракционная решетка. Наконец, подтверждением того, что линии Фойта выступают в качестве первичного преобразователя, чув-

ствительного к ЭМИ, является наблюдаемая частотная зависимость КСВН, связанная с поглощением излучения кожей, физические параметры которой и определяются наличием, так называемых, «проводников» и «изоляторов», формируемых линиями Фойта [30].

Из полученных в экспериментах на мышах результатов [31] следует, что животные реагируют на направление вектора геомагнитного поля (ГМП). По имеющимся представлениям, чем большая площадь тела животного оказывается перпендикулярной вектору магнитного поля, тем следует ожидать большего значения наводимого сигнала и соответствующей реакции животного. Результаты экспериментов в постоянном магнитном поле (ПМП) [32] также показали, что поведенческие реакции мышей после воздействия, по сравнению с исходными, зависят от положения животного в экспериментальном поле. Наибольший эффект наблюдался при совпадении направления главной оси тела животного и вектора напряженности поля, т. е. когда вектор перпендикулярен «виткам соленоида», сформированного линиями Фойта.

Авторы гипотезы сенсорной системы восприятия ЭМИ [28] предполагают, что независимо от механизма и материального субстрата, который обеспечивает медиацию, самым существенным в рецепции ЭМИ является возникновение афферентного сигнала, приводящего к изменению степени активации гипоталамо-гипофизарно-надпочечниковой системы. По сути, животные, благодаря подобной системе, обладают способностью изменять свое адаптивное состояние и таким образом поддерживать его в определенном тоне, оптимальном для реагирования на любые воздействия, с которыми это животное может сталкиваться.

Важным моментом в обсуждении предложенной гипотезы является существование асимметрии в системе линий Фойта. У всех исследуемых мышей наблюдалась асимметрия линий Фойта справа и слева, которая, по мнению авторов, способствует повышению чувствительности к синфазному сигналу. Асимметрия дает, по аналогии с различными техническими дифференциальными системами (начиная от дифференциального усилителя), повышенную чувствительность к разности сигнала.

При движении мышца пересекает силовые линии геомагнитного поля. Это может приводить к наведению в «проводниках» токов, величина которых зависит от скорости изменения магнитного потока через проводящий контур и сопротивления «проводников» ( $F = HS\sin\phi$ , где  $F$  – поток магнитной индукции;  $S$  – площадь контура;  $\phi$  – угол между плоскостью контура и направлением силовых линий поля).

Таким образом, линейное перемещение мышцы, дыхательные движения животного, а также повороты и подъемы могут наводить индук-

ционные токи. Так, при расположении животного с востока на запад или с запада на восток дыхательные движения не приводят к индукции токов. При движении мышцы перпендикулярно горизонтальной составляющей вектора ГМП на дорсальной (dors), вентральной (ventr) и боковых (side) поверхностях наводится электродвижущая сила, индуцирующая возникновение соответствующих токов:

$$U_h^{side} = \frac{dl}{dt} k H_h;$$

$$U_v^{dors} = U_v^{ventr} = \frac{dl}{dt} k H_v,$$

где  $H_h$  – горизонтальная составляющая геомагнитного поля;  $H_v$  – вертикальная составляющая геомагнитного поля;  $V$  – скорость движения мышцы;  $I_h^r$  – токи, индуцируемые при пересечении горизонтальной составляющей ГМП при дыхании животного;  $I_v^m$  – токи, индуцируемые при пересечении вертикальной составляющей ГМП при движении животного;  $\Delta S$  – изменение площади сечения грудной клетки мышцы при выдохе.

При движении мышцы вдоль горизонтальной составляющей вектора ГМП на дорсальной и вентральной поверхностях наводится электродвижущая сила, индуцирующая возникновение соответствующих токов:

$$\Sigma U^m = U_v^{dors} + U_v^{ventr}.$$

При аналогичном расположении мышцы ее дыхательные движения, приводящие к изменению площади сечения грудной клетки, наводят ЭДС на всей поверхности тела. Направление индуцируемых токов при этом зависит от направления изменения площади сечения, т. е. вдох и выдох приводят к возникновению разнонаправленных токов:

$$\Sigma U^r = \pm(U_h^{dors} + U_h^{ventr} + 2U_h^{side}).$$

Суммируя результат действия движения и дыхания, мы получим (вдох):

$$\Sigma U = 2U_h^{side} = (U_h^{dors} - U_v^{dors}) + (U_h^{ventr} + U_v^{ventr});$$

$$\Sigma U = 2 \frac{dS^{side}}{dt} k H_h + \frac{dS^{ventr}}{dt} k H_h + \frac{dl^{ventr}}{dt} k H_v +$$

$$+ \frac{dS^{dors}}{dt} k H_h - \frac{dl^{dors}}{dt} k H_v.$$

Таким образом, токи, индуцируемые на боковых поверхностях, зависят от дыхательных движений. Токи, индуцируемые на дорсальной

поверхности, максимальны при выдохе и минимальны при вдохе. Токи, индуцируемые на вентральной поверхности, максимальны при вдохе и минимальны при выдохе.

Исследование восприятия электромагнитного излучения человеком [33] приводит Т.И. Котровскую к решению об отсутствии каких-либо специфических образований. В своих работах они опираются на возможное участие известных рецепторов. Исследования сенсорных реакций человека на слабые электромагнитные воздействия показали, что по субъективным отчетам испытуемых модальности возникающих ощущений распределяются следующим образом: покалывание — 38,2 %, давление — 29 %, тепло-холод — 12 %, прикосновение — 9,2 %, вибрация, пульсация — 5,2 %, ломота, распирающее — 3 %, зуд, боль, жжение — 3 % [34]. Судя по модальности возникающих ощущений, в рецепции электромагнитного стимула принимают участие или механорецепторы, или свободные нервные окончания — немиелинизированные эфферентные волокна без корпускулярных структур на конце [35, 36].

Поскольку для рецепции таких слабых стимулов, какими являются низкоинтенсивные электромагнитные поля, нужно либо медленно адаптирующиеся рецепторы, либо рецепторы с фоновой активностью, а лучше — то и другое вместе, то из механорецепторов такими могут быть только окончания Руффини, тактильные диски, диски Меркеля. Болевые рецепторы (ноцицепторы) кожи также отвечают этим требованиям. Они представляют собой свободные нервные окончания с тонкими миелинизированными или немиелинизированными нервными волокнами и характеризуются следующими свойствами: полиспецифичность по отношению к стимулам; модальность ощущений — покалывание, жжение — которые специалисты трактуют как «предболь»; исчезновение электромагнитной чувствительности после обработки кожи хлорэтилом, который «выключает» болевые рецепторы; сенсорный отклик в больном органе при облучении соответствующих дерматомом (конвергенция ноцицептивных афферентов от дерматомов внутренних органов на одни и те же нейроны болевых путей, при этом проявляется гиперчувствительность кожи из-за того, что висцеральные импульсы повышают возбудимость вставочных нейронов, и возникает фасилитация, т. е. «облегчение»).

Исследования восприятия электромагнитных сигналов показали наличие длительного латентного периода их распознавания, что, по мнению авторов, связано с содержанием перцептивного процесса [34]. Последний условно можно разделить на три этапа: 1) анализ физиче-

ских характеристик стимула; 2) синтез сенсорной и несенсорной информации о стимуле; 3) опознание стимула, то есть отнесение его к определенному классу объектов. Выяснено, что ощущение возникает только на втором этапе сенсорно-перцептивного процесса. При этом внешний объект предстает в сознании как совокупность его физических характеристик. Осознание стимула происходит на третьем этапе.

Каждому этапу соответствует свой тип ответной реакции: первому – автоматизированный условный рефлекс с латентностью около 100...200 мс от момента действия стимула, второму – реакция в ответ на ощущение (200...400 мс), третьему – ответы организма, которые формируются на базе полного осознания значимости стимула. Реакции этого типа имеют неограниченную латентность, т. к. ответ может последовать и спустя длительное время [37]. Вероятно, реакция опознания электромагнитного сигнала идет по 3-му типу, при этом латентный период на 3 порядка превышает время реакции в зрительной, слуховой сенсорных системах и составляет 40...50 с.

Рассматривая возможные причины задержки сигнала при сенсорных реакциях, выделяют 4 основных блока рефлекторной дуги: рецептивное поле  $\Rightarrow$  проводящие пути  $\Rightarrow$  подкорковый блок анализа стимулов  $\Rightarrow$  корковый блок анализа, формирование ощущений и вербализация [38]. В первом блоке задержек не должно быть, во втором блоке возможны задержки при большом количестве синаптических переключений, проведения афферентных сигналов по немиелинизированным нервным волокнам, включения гуморальных звеньев; в третьем и четвертом блоках могут возникнуть существенные задержки из-за трудностей идентификации такого сигнала, как электромагнитное поле.

Подробное изучение возникающих под действием ЭМИ изменений активности мозга показало, что СВЧ-поля вызывают возникновение неспецифической (не зависящей от параметров) диффузной (во всех участках мозга) ЭЭГ-реакции синхронизации, которая заключается в увеличении числа медленных волн и веретен в ЭЭГ [39]. По другим данным, была выделена наиболее интенсивная реакция в больших полушариях, гипоталамусе и неспецифических ядрах таламуса [40]. Есть сообщения о градации интенсивности ЭЭГ-реакции на СВЧ-поле: наибольшая в гипоталамусе, и по убывающей: кора, таламус, гиппокамп, ретикулярная формация [41]. Полученные экспериментальные данные [33] по сенсорной индикации КВЧ-излучений продемонстрировали влияние последних на пространственно-временную организацию биопотенциалов мозга человека. Эти данные не позволяют отнести пути

проведения сигнала от электромагнитного воздействия к специфическим.

В свою очередь, для неспецифической системы характерно, что афферентные входы не так четко определены, система может возбуждаться сигналами, сходящимися от всех сенсорных поверхностей (полиmodalная или полисенсорная конвергенция). Особенности восприятия и проведения электромагнитного сигнала позволили предположить [38], что оно осуществляется, главным образом, неспецифической (экстралемнисковой) соматосенсорной системой. Основные функции неспецифической системы – эмоциональная окраска восприятия, контроль состояния сознания, ориентировочные реакции.

## 6.5. Заключение

Основные особенности электромагнитного излучения на организмы, рассмотренные в § 6.1–6.3 можно кратко суммировать в виде таблиц. Ниже в табл. 6.1–6.3 представлены те проявления физических и физиологических механизмов воздействия на системы организма, которые имеют непосредственное значение для здоровья человека. Анализ этих данных сделан в общем заключении к обзору. Что касается сенсорных систем, которые могли бы дать чувственное восприятие электромагнитного излучения, специальных работ по этой проблеме очень мало, большинство их относится к области низких частот. Поэтому выводы, сделанные на основании обзора доступных публикаций, носят предположительный характер. Основной тезис – сенсорная система содержит неспецифические сенсоры (механорецепторы, болевые рецепторы, нервные окончания), сигналы в которых формируются изменением состояния биологических структур на микроуровне. В качестве макросистемы, способствующей формированию таких сигналов за счет усиления воздействия электромагнитного поля на сенсоры, могут рассматриваться линии Фойта.

Таблица 6.1

*Тепловые эффекты*

|   |   |  |
|---|---|--|
| 1 | Механизм воздействия излучения теплового уровня | 1. Нагрев биологических тканей за счет поляризационных потерь в водной компоненте  |
| 2 | Последствия на клеточном уровне                 | 1. Изменение химической активности воды и электролитов.<br>2. Изменение функциональной активности белков, в том числе ферментов.<br>3. Изменение метаболических процессов, снижение уровня жизнедеятельности клеток.<br>4. Смерть клеток |
| 3 | Последствия на уровне организма                 | 1. Угнетение и рассогласование функционирования систем организма.<br>2. Снижение иммунитета.<br>3. Хронические заболевания   |

Таблица 6.2

*Воздействие электромагнитного излучения нетеплового уровня*

| Поз. | Объект воздействия | Возможный физический механизм  | Биологически важные последствия   |
|------|--------------------|--|---|
| 1    | Молекулы воды      | Раскачка колебаний в водных кластерах<br>а) при непосредственном взаимодействии с ЭМИ;<br>б) за счет взаимодействия с биомолекулами типа АТФ | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Изменение химической активности воды и электролитов.</li> <li>• Изменение степени гидратации белков и за счет этого изменение их функциональной активности</li> </ul>  |
| 2    | Биомакромолекулы   | Синхронизация и накопление энергии в колебательных модах в цепных структурах белков и ДНК  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Конформационные переходы в белковых молекулах и за счет этого изменение функциональной активности:               <ul style="list-style-type: none"> <li>а) ферментов;</li> <li>б) воротных белков;</li> <li>в) транспортных белков.</li> </ul> </li> <li>• Разрыв нитей ДНК.</li> <li>• Изменение третичной структуры хромосом и модификация считывания</li> </ul> |
| 3    | Мембраны           | Возбуждение акустоэлектрических волн   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Изменение распределения заряда на мембране.</li> <li>• Конформационные переходы в белковых молекулах, встроенных в мембрану, и изменение их функциональных свойств</li> </ul>  |
| 4    | Биоткани           | Локальный нагрев в пучностях стоячей волны при интерференции электромагнитных волн   | Изменение активности метаболических процессов   |

*Физиологические механизмы рецепции*

| Поз. | Степень механизма    | Тип проявления  |
|------|----------------------|---|
| 1    | Рецепция излучения   | 1. Механорецепторы:<br>а) тельца Руффини;<br>б) диски Меркеля.<br>2. Болевые рецепторы.<br>3. Иммунокомпетентные клетки:<br>а) тучные клетки;<br>б) лимфоциты   |
| 2    | Афферентная медиация | 1. Нервный сигнал:<br>а) модуляция потенциала действия;<br>б) генерация потенциала действия.<br>2. Гуморальный сигнал.<br>3. Сосудисто-вегетативный отклик  |
| 3    | Реакция ЦНС          | 1. Кора головного мозга – интегральная оценка афферентной соматосенсорной информации.<br>2. Гипоталамус – реакции центров регуляции вегетативных функций, в том числе реакция системы регуляции уровня кортикостероидов в крови |
| 4    | Эфферентный отклик   | 1. Нейрогуморальный.<br>2. Нервный.<br>3. Сосудисто-двигательный:<br>а) изменение тонуса;<br>б) изменение кровоснабжения тканей   |

*Список литературы к главе*

1. 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. – 169 с.
2. Чукова Ю.П. Изотермические процессы взаимодействия электромагнитного поля с биообъектами // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 8. – С. 48–61.
3. Millimeter absorption spectroscopy of aqueous systems / Yu.Y. Khurgin [et al.] // Advances in Chemical Physics. – 1994. – V. 87. – P. 483.
4. Хургин Ю.И. О роли активации воды в лекарственной и КВЧ-терапии / Ю.И. Хургин, О.В. Лебедев, Е.Ю. Максарева // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 4. – С. 28–32.
5. Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных миллиметровых волн на биоло-

- гические объекты // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 2001. – № 3. – С. 5–19.
6. Бецкий О.В. Механизмы первичной рецепции низкоинтенсивных миллиметровых волн у человека // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 135–138.
  7. Физика взаимодействия миллиметровых волн с биологическими объектами / В.И. Петросян [и др.] // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 140–143.
  8. Роль резонансных молекулярно-волновых процессов в природе и их использование для контроля и коррекции состояния экологических систем / В.И. Петросян [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2001. – № 5–6. – С. 62–127.
  9. О биофизическом механизме воздействия миллиметровых излучений на биологические процессы / А.П. Жуковский [и др.] // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 152–153.
  10. О биохимическом механизме воздействия миллиметровых излучений на биологические процессы / А.П. Жуковский [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1993. – № 2. – С. 36–42.
  11. On biophysics mechanisms of the effects of extremely high frequency electromagnetic field on cell membranes / M. Kuzmanova [et al.] // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 157.
  12. Биофизический механизм возникновения акустоэлектрических волн на клеточной мембране / А.Н. Волобуев [и др.] // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1995. – № 5. – С. 14–17.
  13. Frohlich H. Bose condensation of strongly excited longitudinal electric modes // Phys. Lett. – 1968. – V. 26A. – P. 402.
  14. Хижняк Е.П., Зискин М.С. Механизмы взаимодействия электромагнитного излучения миллиметрового диапазона с биологическими объектами // Сб. докладов XI Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 2–12 апреля, 1997 г. – М., 1997. – С. 128–131.
  15. Лебедева Н.Н. Нейрофизиологические механизмы биологических эффектов при периферическом воздействии на человека неионизирующими низкоинтенсивными полями // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 138–140.

16. Родштат И.В. Физиологические механизмы КВЧ-модуляции иммунореактивных и нервных тканей по данным экспериментальных и клинических работ // Доклады X Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии». Москва, 24–26 апреля 1995 г. – М., 1995. – С. 145–147.
17. Гуревич М.Е. Реакция лимфатических узлов мышц на СВЧ-излучение миллиметрового диапазона в зависимости от места воздействия и исходного состояния животных: автореф. дис. ... канд. мед. наук / М.Е. Гуревич; Томский медицинский институт. – Томск, 1987.
18. Лебедева Н.Н. Физиологические механизмы биологических эффектов низкоинтенсивных электромагнитных волн миллиметрового диапазона // Доклады XI Российского симпозиума «Миллиметровые волны в медицине и биологии», Москва, 2–12 апреля 1997 г. – М., 1997. – С. 126–128.
19. Ковалев А.А., Пресняков О.В. Механизм первичного влияния на кору головного мозга человека проявлений трансформации в его организме внешнего низкоэнергетического КВЧ-излучения // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1999. – № 2(14). – С. 25–36.
20. Лебедева Н.Н., Котровская Т.Н. Электроманитная рецепция и индивидуальные особенности человека // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1996. – № 7. – С. 14–19.
21. Magnetit in human tissues: the mechanism for biological effects of weak ELF magnetic fields / J.L. Kirschvink [et al.] // Bioelectromagnetics. – 1992. – V. 1. – P. 101–103.
22. Kirschvink J.L., Gould J.L. Biogenic magnetit as a basis for magnetic field detection in animals // BioSystems. – 1981. – V. 13. – P. 181.
23. Kirschvink J.L. Magnetit biomineralization in a human brain / J.L. Kirschvink, A. Kobayashi-Kirschvink, B.J. Woodford // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 1992. – V. 89 (16). – P. 7683–7687.
24. Бэкер Р. Робин. Магниторецепция у человека и других приматов // Биогенный магнетит и магниторецепция. – М.: Мир, 1989. – Т. 2. – С. 342–374.
25. Розенблюм Б. Ограничения при рассмотрении индукционной гипотезы магниторецепции / Б. Розенблюм, Р.Л. Юнгерман, Л. Лонгфеллоу // Биогенный магнетит и магниторецепция. – М.: Мир, 1989. – Т. 1. – С. 293–305.
26. Калантаевская К.А. Морфология и физиология человеческой кожи. – Киев, 1972. – С. 267.
27. Чуприкова Е.М., Перельмутер В.М. Особенности расположения волосяных фолликулов на коже мыши // Актуальные проблемы медицинской биологии. – Томск: СГМУ, 2002. – С. 54–55.

28. Гипотеза: «Линии Фойта (упорядоченное расположение волосяных фолликулов) сенсорная система электромагнитных излучений» / В.И. Зеленцов [и др.] – Интеллектуальный продукт № 72200200008, зарегистрирован ВНТИЦ 06.03.2002 г.
29. Шаловой В.В. Морфофункциональная характеристика кожи мышей при воздействии низкоинтенсивного КВЧ-излучения миллиметрового диапазона: автореф. дис. ... канд. мед. наук / В.В. Шаловой. – Томск, 1995. – 29 с.
30. Шаловой В.В. Связь параметров линий Фойта с адаптивной системой / В.В. Шаловой, В.М. Перельмутер, З.И. Ржевская. – Томск, 1993. – 9 с. – Деп. В ВИНТИ 01.07.93, № 1816-В93.
31. Способ регистрации биологического действия слабых электромагнитных полей / В.И. Зеленцов [и др.]. – М., 1999. – Патент на изобретение от 10.09.99 № 98102648/14(992080).
32. Чуприкова Е.М. Роль иерархического статуса экспериментальных животных в реагировании на слабые воздействия // Сборник статей молодых ученых и студентов «Современные проблемы фундаментальной и клинической медицины». – Томск, 1999. – С. 39–40.
33. Котровская Т.И. Сенсорные реакции человека при действии слабого электромагнитного стимула // Миллиметровые волны в биологии и медицине. – 1994. – № 3. – С. 32–38.
34. Лебедева Н.Н. Реакция центральной нервной системы человека на электромагнитные поля с различными биотропными параметрами: дис. ... д-ра биол. наук в форме науч. докл. / Н.Н. Лебедева. – М., 1992. – 48 с.
35. Кориневская И.В. ЭЭГ-корреляты человека при разносторонне периферическом воздействии переменным магнитным полем / И.В. Кориневская, Ю.А. Холодов, А.В. Кориневский // Физиология человека. – 1993. – Т. 19(3). – С. 71–79.
36. Иваницкий А.М. Информационные процессы мозга и психическая деятельность / А.М. Иваницкий, В.Б. Стрелец, И.А. Корсаков. – М.: Наука, 1984. – 201 с.
37. Холодов Ю.А., Лебедев Н.Н. Реакции нервной системы человека на электромагнитные поля. – М.: Наука, 1992. – С. 96.
38. Родштат И.В. Психофизический подход к оценке некоторых реакций организма при лечебном воздействии миллиметровых волн. – Препринт № 11(52). – М.: ИРЭ АН СССР, 1989. – С. 21.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в этом обзоре биологические эффекты электромагнитного излучения дают общее представление о значимости этого физического фактора для здоровья человека. Электромагнитные волны даже нетепловой мощности с интенсивностью на уровне шумов или паразитного излучения от бытовых и технологических устройств оказывают воздействие на биологические структуры начиная с биомолекул и заканчивая организмом в целом.

Основные наблюдаемые результаты воздействия электромагнитного излучения нетепловой интенсивности на биологические объекты различного уровня организации, наиболее важные с точки зрения здоровья человека, можно свести в обобщенную таблицу, представленную ниже.

Таблица

*Биологические эффекты электромагнитного излучения*

| Объект воздействия                | Диапазон частот   | Результат воздействия  |
|-----------------------------------|---|--|
| <b>Молекулы воды в биообъекте</b> |   |  |
| Молекулы воды в биообъекте        | 1...150 ГГц   | а) изменение структуры водных кластеров;<br>б) изменение химической активности воды;<br>в) изменение гидратации белковых молекул |
| <b>Биомолекулы</b>                |   |  |
| ДНК                               | 1...80 ГГц  | разрыв цепи, блокирование считывания   |
| Ферменты                          |   | изменение конформационного состояния, следствие этого – изменение функциональной активности                                      |
| Мембранные белки                  |   | изменение эффективности транспорта ионов и молекул через мембраны  |
| Транспортные белки                |   | модуляция сродства к транспортируемым молекулам  |
| <b>Мембраны</b>                   |   |  |
| Мембраны                          | 50...80 ГГц   | а) повышение устойчивости мембран  |
|                                   | 50...80 ГГц   | б) изменение распределение заряда на поверхности, изменение мембранного потенциала   |
|                                   | 50...80 ГГц, ультракороткие импульсы с несущей $f = 10$ ГГц | в) изменение проницаемости для ионов $Na^+$ и $K^+$ , молекул воды   |
|                                   | 40... 60 ГГц  | г) изменение проведения нервного импульса  |

| Клетки                           |              |   |
|----------------------------------|--------------|---|
| Клетки                           | 1... 70 ГГц  | 1. Изменение резистентности мембран.<br>2. Изменение динамики и структуры белковой системы на поверхности мембран, изменение функциональных свойств иммунокомпетентных клеток.<br>3. Модификация метаболических процессов.<br>4. Ингибирование или стимуляция деления клеток.<br>5. Программируемая смерть клеток |
| Ткани                            |              |   |
| Ткани                            | 40... 60 ГГц | Стимулирование регенерации тканей   |
| Функциональные системы организма |              |   |
| Нервная система                  | 1... 60 ГГц  | 1. Активация спонтанной активности рецепторов.<br>2. Реакция синхронизации ЦНС при бодрствовании.<br>3. Увеличение динамичности ЦНС при заторможенном состоянии вплоть до эпилептоморфной активности  |
| Эндокринная система              |              | адаптивная реакция, приводящая к коррекции концентрации гормонов в эндокринной системе  |
| Репродуктивная система           |              | изменение функционального состояния половой системы, увеличение числа неблагоприятных репродуктивных исходов, спонтанных аборт  |
| Целостный организм               |              |   |
| Целостный организм               | 1...70 ГГц   | а) возникновение ощущений жжения, покалывания, давления и т. д.;<br>б) нарушения поведения;<br>в) изменение памяти;<br>г) развитие заболеваний  |

Сделанный обзор работ, посвященных изучению влияния электромагнитного излучения на биологические объекты, позволяет сделать следующие выводы.

1. Биологические эффекты электромагнитного излучения сантиметрового и миллиметрового диапазона существуют даже при нетепловом уровне интенсивности.
2. В основе этих эффектов лежит резонансные взаимодействия электромагнитной волны с молекулами воды в биологических структурах, с биомакромолекулами, мембранами.
3. Несмотря на то, что энергия кванта электромагнитного поля в диапазоне частот 1...150 ГГц мала по сравнению с тепловой энергией биологической среды  $kT$ , структурные особенности биологических молекул и мембран позволяют накапливать энергию в акусто-

электрических колебаниях для осуществления структурных (конформационных) переходов.

4. Такие переходы модифицируют функциональные возможности биомакромолекул, что в свою очередь изменяет протекание биологических процессов (метаболизм, транспорт, проведение импульса и т. д.).
5. Изменение динамики биологических процессов могут носить как стимулирующий, так и ингибирующий характер, в зависимости от параметров воздействующего электромагнитного излучения, в первую очередь, от его частоты.
6. Эффективность воздействия определяется не только параметрами излучения, но соответствием этой частоте собственных частот биологических структур, спектр которых может различаться от объекта к объекту. Этим во многом объясняется плохая воспроизводимость результатов экспериментов.
7. Результат воздействия на уровне целого организма зависит от исходного состояния функциональных систем и места воздействия (из-за наличия функциональной асимметрии).
8. Описанные патологические и терапевтические эффекты электромагнитного излучения имели место, как правило, при многократном или хроническом облучении. Однако имеющихся данных недостаточно для определения наиболее эффективных или опасных частот и режимов излучения.
9. Особенно это справедливо для коротких (короче применяемых в радиолокации) СВЧ-импульсов и ультраширокополосных сигналов. Имеется лишь несколько экспериментальных работ на животных, в которых изучается биологическое действие таких импульсов.
10. Исходя из того факта, что спектр излучения таких сигналов, рассчитанный в главе, и частотный диапазон, в котором наблюдаются биологические эффекты, перекрываются, следует ожидать влияния таких импульсов на здоровье человека, в том числе и патологических эффектов. Однако прямая экстраполяция результатов, полученных с другими параметрами излучения, для прогнозирования опасности ультраширокополосных сигналов в настоящее время не оправдана из-за недостаточности данных. Необходимы дальнейшие исследования и желательно с использованием генераторов ультракоротких СВЧ-импульсов.

Учебное издание

ПЕРЕЛЬМУТЕР Владимир Михайлович  
ЧА Владимир Александрович  
ЧУПРИКОВА Елена Михайловна

## **МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН С ОРГАНИЗМОМ**

Учебное пособие

Редактор  
Компьютерная верстка  
Дизайн обложки

*А.В. Высоцкая  
О.Ю. Аршинова  
О.Ю. Аршинова  
О.А. Дмитриев*

Подписано к печати 17.07.2009. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».  
Печать XEROX. Усл. печ. л. 7,44. Уч.-изд. л. 6,73.  
Заказ 830-09. Тираж 200 экз.



Томский политехнический университет  
Система менеджмента качества  
Томского политехнического университета сертифицирована  
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2008

