

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего
профессионального образования

Томский университет систем управления и радиоэлектроники
Томский государственный университет

А.Г. Карташев, М.А. Большаков

Основы электромагнитной экологии.

Рекомендовано Сибирским региональным учебно-методическим центром
высшего профессионального образования в качестве учебного пособия для
высших учебных заведений РФ.

Томск, 2012

УДК 577.158.4
ББК 28.08
К 27

А.Г. Карташев, М.А. Большаков
Основы электромагнитной экологии
Учебное пособие. Электронный вариант. Томск, 2011г.

В учебном пособии рассмотрены современные научные и прикладные аспекты электромагнитной экологии. Авторы, на основании собственных исследований и научных данных, в доступной форме рассмотрели широкий спектр электромагнитных воздействий биосистем с ЭМП естественной и техногенной природы.

Учебное пособие предназначено для преподавателей и студентов, специализирующихся в области экологии.

Оглавление

Введение	5
Оглавление.....	8
Часть 1. Электромагнитная экология низкочастотных электромагнитных излучений.....	9
Глава I. Физические и биологические аспекты взаимодействия ЭМИ с биосистемами.	9
Физические характеристики электромагнитных полей	9
Переменное электромагнитное поле.....	13
Физика взаимодействия ЭМП с веществом.....	14
Уровень естественного фона ЭМП Земли.....	17
Электромагнитные поля антропогенного происхождения...	29
Влияние ЭМП на биосистемы.....	34
Действие ЭМП на организм человека.....	39
<u>Глава II. Экологические аспекты электромагнитного состояния окружающей среды.....</u>	<u>42</u>
А.Л. Чижевский – основоположник современной и электромагнитной экологии.....	42
Экологическая роль флуктуаций естественных ЭМП	47
Биогенный магнетизм.....	49
Экологические особенности реакций биосистем в магнитных полях...	53
Экологические особенности влияния ЭМП антропогенного происхождения на биосистемы.....	66
Экологическое влияние ЭМП низкочастотного диапазона	69
Полевые исследования под ЛЭП-500.....	71
Экологическое влияние электрического фактора ЛЭП.....	75
Хроническое влияние ПчЭП на физиологические системы организма.....	81
Электромагнитные воздействия на водные экосистемы.....	91
Электрорецепция.....	98
Часть 2. Электромагнитная экология радиочастотных электромагнитных излучений.....	104
Глава III. Физические и эколого-биологические аспекты взаимодействия радиочастотных ЭМИ с биосистемами.....	104
Характеристика радиочастотных ЭМИ, как экологически значимого фактора.....	104
Естественные и техногенные источники электромагнитных излучений радиочастотного диапазона.....	111
Экологические и биологические аспекты действия радиочастотных электромагнитных излучений.....	118

Действие ЭМИ на индивидуальное развитие. Онтогенез	
<i>Drosophila melanogaster</i> в условиях электромагнитного воздействия..	.140
Биологическое действие ЭМИ КВЧ (мм-длины волн).....	...154
Механизмы биологического действия радиочастотных ЭМИ.....	...159
Глава IV. Нормирование радиочастотных ЭМИ.	
Меры электромагнитной безопасности.....	...174
Действие радиочастотных ЭМИ на функционирование биосистем	
разного уровня организации и влияние на здоровье человека.....	...174
Нормирование радиочастотных электромагнитных излучений, инструментальный контроль и биоиндикация электромагнитного загрязнения.....	.180
Система мер по обеспечению электромагнитной безопасности.....	...194
Проблемы электромагнитной экологии радиочастотных ЭМИ.....	.197
Заключение.....	211
Список использованных сокращений.....	215
Рекомендуемая литература.....	..216

Введение

Интерес к влиянию электромагнитных полей на живые организмы появился у человека достаточно давно по мере знакомства его со свойствами магнитного железа. Открытие электричества, электромагнитная индукция, развитие электроэнергетики и радиосвязи стимулировало развитие электромагнитной биологии. Многочисленные исследования в электромагнитобиологии установили, что электромагнитные поля влияют на биохимические, физиологические и функциональные процессы биосистем. Разработанные на основании проведенных исследований санитарно-гигиенические нормативы определили допустимые уровни воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ) в производственных помещениях. Значительное увеличение бытовой электромагнитной техники, электронных средств передачи информации и связи, в особенности, сотовой телефонии, создали за последние 40 лет новую техногенную электромагнитную среду. Для антропогенной электромагнитной среды характерно глобальное повсеместное распространение со значительным локальным повышением уровня ЭМИ в городах. Превышение над естественным уровнем электромагнитного фона в сотни и тысячи раз в частотном диапазоне от нуля до десятков гигаГерц. Необходимо отметить, что уровень ЭМИ в диапазоне сотовой телефонной связи: 400 мГц – 10 гГц неуклонно возрастает с увеличением числа пользователей и количеством базовых станций. Хронический характер действия техногенных ЭМИ приводит к многочисленным изменениям экологических показателей биосферного и организационного уровня.

Электромагнитная экология, развиваясь в пограничной области биологии, экологии, физики и химии, исследует гелиобиологические вариации естественного ЭМИ Земли, влияние низкочастотных – пятидесятигерцовых полей ЛЭП на экосистемы, высокочастотных ЭМИ и

экологические механизмы взаимодействия ЭМИ с биосистемами в зависимости от уровня организации.

Современная методологическая литература по электромагнитной экологии, нуждается в дополнении и более комплексной систематизации научных данных. Основываясь на подготовке лекционного курса по электромагнитной экологии, авторы предприняли издание учебного пособия позволяющего студентам экологических специальностей и интересующимся экологическими проблемами, достаточно свободно ориентироваться в области электромагнитной экологии. Материал предлагаемого учебного пособия условно поделён на две части, определяемые содержанием: экология постоянных и низкочастотных магнитных, электрических и электромагнитных полей и экологические аспекты радиочастотных электромагнитных излучений.

В первой части рассмотрены особенности влияния постоянных и низкочастотных электрических и магнитных полей на биосистемы в зависимости от уровня их организации. Большое внимание уделено биологическому действию электромагнитных полей промышленного диапазона частот (50-60 Гц). Проведён анализ действия электрических полей ЛЭП на экосистемы. Рассмотрены современные критерии гигиенического и экологического нормирования ЭМП. Представлены современные механизмы биологического действия электрических и магнитных полей. Проведён анализ флуктуаций естественных геомагнитного и электрического полей Земли, их взаимосвязь с солнечной активностью.

Вторая часть учебного пособия посвящена изложению материалов, касающихся электромагнитной экологии радиочастотных излучения. В содержании этой части представлены физические и эколого-биологический аспекты влияния радиочастотных ЭМИ на живые системы, а также рассмотрены вопросы нормирования и меры электромагнитной безопасности. Представлены основные физические характеристики радиочастотного ЭМИ как экологически значимого фактора.

Охарактеризованы источники естественного и техногенного излучений с акцентированием влияния на новых источниках электромагнитного загрязнения, в частности, на мобильной связи. Рассмотрены наиболее характерные биологические эффекты и медицинские последствия кратковременного или хронического воздействия ЭМИ, проанализированы основные закономерности и существующие механизмы биологического действия, указаны физиологические системы организмов, критичные к неблагоприятному влиянию.

Для ясного понимания существующей системы мер снижения неблагоприятного влияния ЭМИ на людей и живую природу в учебном пособии представлена информация о гигиеническом нормировании данного фактора: история, принципы нормирования, нормативные документы. Рассмотрены вопросы дозиметрии, инструментальном контроле электромагнитной обстановки, биоиндикации и системе мер электромагнитной безопасности. Рассмотрены проблемы электромагнитной экологии. Хорошие знания электромагнитной экологии позволят специалистам-экологам эффективно решать проблемы современной антропогенной экологии.

Оглавление

Часть 1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭКОЛОГИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

Глава I. ФИЗИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМИ С БИОСИСТЕМАМИ.

ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ.

Электромагнитная среда современной биосферы включает три основных экологически значимые компоненты: естественные ЭМП Земли, флуктуации естественных полей; вызванные солнечной активностью и другими космическими вариациями; техногенные ЭМП. Необходимо отметить, что

эволюция живых организмов на протяжении многих миллионов лет протекала и адаптировалась в низкочастотном диапазоне естественных флуктуаций. Значительное, в несколько десятков тысяч раз, повышение электромагнитной составляющей высокочастотного спектра за последние 70 лет в результате человеческой деятельности, привело к относительно быстрой, в эволюционном отношении, трансформации электромагнитной среды биосферы.

Следует подчеркнуть, что новая техногенная электромагнитная компонента появилась не в характерном для развития жизни, высокочастотном диапазоне. Глобально распространена по всей биосфере, обладает высокой степенью гетерогенности, превышает естественные уровни в тысячи раз и возникла в относительно короткий промежуток времени.

В зависимости от природы происхождения все ЭМП подразделяются на поля естественного и техногенного происхождения.

Электромагнитные факторы – инструментально дифференцируемые ЭПМ по их физическим характеристикам и оказывающие на биосистемы положительное или отрицательное влияние.

Например: постоянное магнитное поле может быть инструментально измерено в каждой точке пространства и оказывать непосредственное влияние на биосистемы.

В связи с тем, что ЭМП варьирует по интенсивности частоты, пространственной ориентации, модуляции и т.д., число комбинаций ЭМП достаточно велико, то на первый план выступает характер биологического влияния. В настоящее время, в качестве экологических факторов, рассматривают постоянные магнитные (ПМП) и электронные (ПЭП) поля. В том случае, если длина волны много больше биологического объекта и воздействия, осуществляется в ближней зоне не сформировавшейся волны, то говорят о влиянии переменных магнитных полей (ПеМП) или переменных электрических полях (ПеЭП) в диапазоне от 0.00001 Гц до 1 МГц. В более высокомагнитном диапазоне используются не дифференцированные

показатели электрической и магнитной составляющей, а значения падающей и поглощенной мощности ЭМП.

В зависимости от конкретных задач исследования ли от технических показателей излучающей установки, выясняется биологическая эффективность различных типов модуляции, типы пульсации, скважность и т.д.

Следовательно, электромагнитные факторы формируют электромагнитную среду: естественного и техногенного происхождения, которая взаимодействует с биосферой, экосистемами, популяциями и каждым организмом.

Таким образом, в электромагнитной экологии выделяются два основных раздела: электромагнитная экология низкочастотных ЭМП и электромагнитная экология радиочастотной области.

Электрическое поле возникает вокруг любого заряженного тела, является векторной величиной и характеризуется напряженностью. Напряженность электрического поля (E) называют физической величиной, равной силе, с которой поле действует на единичный положительный заряд, помещенный в рассматриваемую точку пространства:

$$E = k \frac{q_0}{r^2} ,$$

где E – напряженность поля; k – коэффициент, зависящий от системы единиц; q_0 – величина заряда, образующего поле; r – расстояние от заряда до данной точки.

Помимо этого, каждая пространственная точка электрического поля характеризуется энергетической величиной – потенциалом (Π), который эквивалентен работе (A), которую необходимо совершить для перемещения заряда q одноименного знака из бесконечности в данную точку. Тогда потенциал каждой точки электрического поля

$$\Pi = \frac{A}{q} .$$

В практических расчетах, как правило, оперируют значениями напряжения (V), которое определяется как разность потенциалов между двумя точками поля:

$$V = \Phi_1 - \Phi_2 = E \cdot \Delta r.$$

Тогда $E = \Delta \Phi / \Delta r$, или $E = V / d$, т.е. напряженность электрического поля численно равна разности потенциалов, деленной на расстояние между ними, и имеет размерность вольт на метр (В/м). Равномерность напряженности поля в пространстве характеризуется градиентом:

$$\text{grad} E = \frac{\Delta E}{\Delta r}.$$

В биологических и экологических исследованиях, как правило, величину электрического поля определяют по расчетным значениям напряженности $E = V/d$ В/м и градиенту поля с учетом диэлектрической проницаемости среды или коэффициента уменьшения, который для воздуха близок к единице, а для водных растворов – в пределах 80.

Электрические свойства среды характеризуются диэлектрической проницаемостью и удельной электрической проводимостью.

Диэлектрическая проницаемость вещества относительно вакуума $\epsilon' = \epsilon / \epsilon_0$, где ϵ – абсолютное значение диэлектрической проницаемости; $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12}$ ф/м (фарада/метр) – абсолютное значение проницаемости для вакуума.

Удельная электрическая проводимость измеряется в сименсах на метр (сим/м).

Магнитное поле возникает вокруг движущегося в пространстве заряда или при изменении напряженности электрического поля и действует только на движущиеся заряды, т. к. только движущиеся заряды имеют свое магнитное поле.

Для определения интенсивности магнитного поля (МП) используется магнитная индукция – В, равная силе, с которой поле действует на

единичный заряд. Для характеристики внешнего МП вводится напряженность поля (Н):

$$H = \frac{B}{\mu_0} = \frac{I}{2\pi r},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума.

За положительное направление вектора МП принято направление от северного полюса к южному. Траектории движения заряда в магнитном поле называют магнитными силовыми линиями. Достаточно распространенной единицей измерения напряженности МП является эрстед (СГСМ). $1 \text{ Э} = 79,58 \text{ (А/м)} \cong 80 \text{ (А/м)}$, следовательно, на расстоянии 1 м от проводника, по которому протекает ток, равный 80 А, напряженность МП будет равной 1 Э.

Второй необходимой характеристикой магнитного поля является градиент поля $\frac{\Delta H}{H}$, выражаемый в процентах от среднего значения напряженности МП.

ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Постоянное МП и ЭП существуют независимо друг от друга и не взаимодействуют. В тоже время любое изменение электрического поля сопровождается появлением магнитного поля и наоборот. Связанные и способные превращаться друг в друга поля называются электромагнитными. Естественно, что одной из основных характеристик переменного (ЭМП) является частота (f), выражаемая в герцах (Гц) и равная числу колебаний ЭМП в с – $f = 1/T$, где T – период одного колебания. Величина, обратная частоте, – длина волны (λ) или расстояние, на которое распространяется волна за один период:

$$\lambda = \frac{c}{f \sqrt{\epsilon' \mu'}}$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с скорость света в вакууме, а $\varepsilon' = \mu' = 1$ в воздухе. Определяют также амплитуду волны E или H и фазу – φ , характеризующую состояния колебательного процесса в каждый момент времени, и выражающуюся в градусах или относительных единицах, кратных π .

Формирование волны происходит в волновой зоне, на расстоянии, больше длины волны от источника, при этом E и H изменяются в фазе и между их средними значениями за период сохраняется соотношение

$$E = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \cdot H = 377 \cdot H \quad .$$

Весь спектр ЭМП подразделяется на ряд диапазонов, которые представлены в табл. 1.

Весь спектр ЭМП, с практической точки зрения, условно поделен на три участка. Первый – частотный диапазон от 0 до 1 МГц, где действие электрической и магнитной составляющих на биосистемы может рассматриваться отдельно. Второй – УВЧ (1–1000 МГц) – промежуточный, в котором рассматривать отдельно или совместно действие E и H составляющих можно в зависимости от размера биосистемы. Третий – СВЧ-диапазон, в котором на биообъекты действует сформировавшаяся волна и оценивается количество переносимой энергии по плотности потока мощности (S – вектор Пойтинга), $S = E \cdot H$ Вт/м², плотность потока мощности на расстоянии R от источника можно оценить, зная величину всей излучаемой мощности (P):

$$S = \frac{P}{4\pi R^2}$$

Существует по крайней мере два основных типа электромагнитных колебаний: гармонические – E и H изменяются по закону синуса, и модулированные, в которых амплитуда, частота и фаза изменяются по определенному закону. Электромагнитные поля, используемые человеком в электронных средствах связи, являются модулированными. Взаимодействие двух или несколько волн приводит к интерференции – усилению или

ослаблению амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами волн. Если разность фаз между интерферирующими волнами постоянна, то такие ЭМП называют когерентными.

ФИЗИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭМП С ВЕЩЕСТВОМ

Все окружающие нас тела, как правило, электрически нейтральны, потому что в них количество отрицательных зарядов равно числу положительных зарядов. Взаимодействие физических тел с электрическими полями существенно зависит от типа взаимодействия зарядов. Проводники – заряженные частицы: ионы и электроны, могут свободно перемещаться – к ним относятся металлы и электролиты, в которых в зависимости от напряженности ЭП протекает разный по интенсивности ток.

Вещество, в котором отрицательные и положительные заряды связаны между собой, называют диэлектриками: газы, химически чистая вода, фарфор, сухое дерево и т.д.

В некоторых диэлектриках, например воде, связанные заряды имеют несовпадающие «центры масс», при этом одна часть молекулы оказывается положительной, а другая – отрицательной; такие молекулы называются полярными.

Соответственно и диэлектрики подразделяются на полярные и неполярные. При действии ЭП полярные молекулы развернутся, а у неполярных молекул заряды противоположных знаков слегка разойдутся. Ориентация полярных молекул по полю и деформация неполярных называются поляризацией вещества в ЭП, в результате происходит ослабление внешнего ЭП на величину диэлектрической проницаемости, характерной для каждого вещества:

$$E_p = \frac{E}{\epsilon},$$

где E_p – результирующее поле в веществе; E – внешнее поле; ϵ – диэлектрическая проницаемость.

При поляризации вещества в ЭП происходит ориентация молекулярных диполей и смещение зарядов неполярных молекул. В результате с одной стороны поверхности тела возникают заряды одного знака, а с другой стороны – противоположного.

Поверхностная плотность зарядов: $\sigma = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E$ к/м², где E – напряженность поля в среде. Величина $\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E = D$, где D – электрическое смещение, или индукция электрического поля.

При действии переменного электрического поля происходит изменение знака поверхностной плотности заряда, возникающий при этом ток называется током смещения:

$$j_c = \epsilon_0 \epsilon_1 \frac{dE}{dt} \frac{A}{m^2}.$$

При нахождении в ЭП проводника происходит разноименное движение свободных зарядов до тех пор, пока их собственное поле не скомпенсирует внешнее ЭП, так, что внутри проводника поле становится равным нулю. Явление такого рода определяют как электростатическое экранирование, возникающий при этом ток – наведенным, а плотность тока: $j_n = \gamma E$, где γ – удельная проводимость вещества. Для тел, у которых есть свободные и связанные заряды, плотность тока

$$j = \gamma E + \epsilon_1 \epsilon_0 \frac{dE}{dt}.$$

Для определения количества поглощенной энергии веществом при действии переменного электрического поля используется уравнение типа

$$P_E = 3.4 \cdot 10^{-10} \frac{r}{\gamma} f^2 E^2 \text{ Дж/(с·м)},$$

где r – расстояние от оси тела, f – частота ПеЭП.

По отношению к магнитному полю вещества подразделяются на диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики. В диамагнетиках при действии МП возникает вихревое электрическое поле – электромагнитная

индукция, которое приводит к изменению скорости вращения электрона вокруг ядра. В соответствии с изменением угловой скорости электрона возникает и дополнительное магнитное поле, которое направлено против внешнего поля по правилу Ленца и ослабляет его. При этом результирующее МП можно оценить

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H,$$

где B – значение магнитной индукции в веществе; H – напряженность внешнего поля; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – магнитная проницаемость вакуума; μ – относительная магнитная проницаемость.

Для оценки количества энергии при изменении угловой скорости электрона используется выражение

$$W_g = \frac{h\mu_0 e}{2m} \cdot H,$$

где h – постоянная Планка; e – заряд электрона; m – масса электрона.

Явление парамагнетизма обусловлено вращением электронов вокруг собственной оси, приводящее к созданию спинового магнитного поля. Во внешнем МП электроны с нескомпенсированными спиновыми полями разворачиваются по направлению силовых линий внешнего поля, что приводит к его усилению, такие вещества называются парамагнетиками.

Ферромагнетики – вещества, обладающие микроструктурами, которые называются доменами. В доменах нескомпенсированные спиновые магнитные поля однонаправлены и являются магнетиками. Самым распространенным ферромагнитным включением в биосистемах является Fe_3O_4 , Fe^{3+} [Fe^{2+} Fe^{3+}] O_4 .

В переменных магнитных полях (ПеМП) помимо парамагнитных, ферромагнитных и диамагнитных эффектов возникает электромагнитная индукция, приводящая к электрическому току:

$$j = \gamma r \pi f B \cos(\omega t) \frac{A}{M^2},$$

где: j – плотность тока; r – расстояние от оси тела; f – частота; $\omega = 2\pi \cdot f$, при этом количество поглощенной энергии (Пн) будет определяться:

$$P_n = \frac{Nr\gamma\omega^2 B^2 \cos^2 \omega t}{8} \text{ Дж/(с·м}^2\text{)} ,$$

где N – коэффициент, зависящий от геометрических размеров.

Контрольные вопросы:

1. Чем отличаются постоянные поля от переменных?
2. Что такое диэлектрики?
3. Что такое диамагнетики?
4. Какие вещества называют ферромагнетиками?

УРОВЕНЬ ЕСТЕСТВЕННОГО ФОНА ЭМП ЗЕМЛИ

Магнитное поле Земли (ГМП – геомагнитное поле) в каждой точке пространства характеризуется вектором напряженности \mathbf{T} , величина и направление которого в прямоугольной системе координат определяются тремя составляющими \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} (северной, восточной и вертикальной), либо тремя элементами ГПМ: горизонтальной составляющей напряженности \mathbf{H} , магнитным склонением \mathbf{D} (углом между \mathbf{H} и плоскостью географического меридиана) и магнитным наклонением \mathbf{I} (углом между \mathbf{T} и плоскостью горизонта). Геомагнитное поле является совокупностью постоянного (т.н. основного) поля, вклад которого составляет приблизительно 99%, и переменного, на долю которого приходится около 1%.

На земном шаре встречаются местности, в которых магнитные элементы изменяются очень резко и имеют значения, сильно отличающиеся от соответствующих значений в соседних местностях. Такие области называются областями магнитной аномалии. В большинстве случаев причиной магнитной аномалии является наличие под поверхностью Земли больших масс магнитной железной руды. Одной из самых больших магнитных аномалий является Курская магнитная аномалия.

Наличие у Земли постоянного магнитного поля объясняют конвективными движениями проводящего жидкого вещества в земном ядре, в частности гидромагнитным динамо (динамоэффект – самовозбуждение магнитных полей вследствие движения проводящей жидкости или газовой плазмы). Теория динамоэффекта объясняет происхождение и поддержание магнитного поля Земли, а также приводит к возможности самообращения магнитной оси (переполусовке магнитного поля Земли) и долгопериодическим колебаниям магнитного поля Земли (вековым вариациям), что отражает реальные свойства ГМП. Основное поле до высот примерно трёх земных радиусов имеет дипольный характер, на больших высотах структура поля значительно усложняется. Магнитные полюсы Земли (точки, где $\mathbf{H} = \mathbf{0}$) не совпадают с ее географическими полюсами – дипольный (кулоновский) магнитный момент Земли, равный $8 \cdot 10^{25}$ ед. СГС ($8 \cdot 10^{15}$ Вб·м), образует с осью вращения Земли угол в $11,50$ (рис. 1). В середине текущего столетия Южный магнитный полюс Земли лежал в Северном полушарии ($75,80$ северной широты и 960 западной долготы), Северный магнитный полюс – в Южном полушарии ($71,20$ южной широты и $150,80$ восточной долготы). Магнитная ось Земли смещена от центра Земли на 1140 км в сторону Тихого океана. Напряженность \mathbf{T} геомагнитного поля убывает от магнитных полюсов к магнитному экватору (линии, где $\mathbf{I} = 0$) от $55,7$ до $33,4$ А/м (от $0,70$ до $0,42$ Э; $1 \text{ Э} = 79,5775 \text{ А/м}$). Основное магнитное поле испытывает лишь медленные вековые изменения (вариации). Положение магнитных полюсов Земли со временем меняется – с периодом от сотен тысяч до десятков миллионов лет происходит переполусовка основного магнитного поля Земли.

Принимая гипотезу, согласно которой возраст геомагнитного поля сравним с возрастом Земли, рассмотрим геологическое прошлое геомагнетизма.

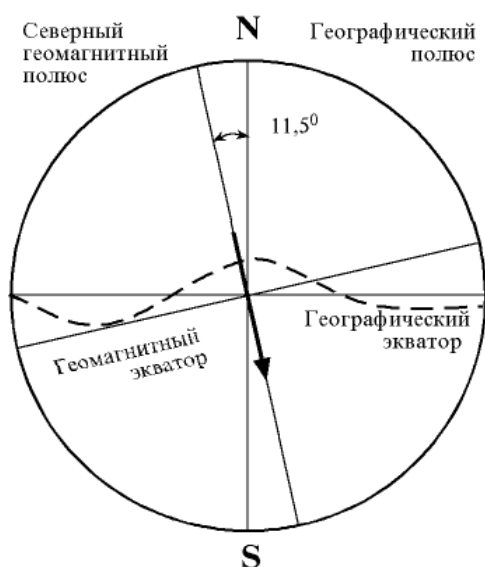


Рис. 1 Схематическое расположение географических и геомагнитных полюсов

Аналогично тому, как этапы биологической эволюции можно проследить по окаменелым органическим останкам, история магнитного поля Земли воспроизводится по палеомагнитным данным. Окаменелые твердые породы в процессе остывания приобретают естественную остаточную намагниченность, направление которой совпадает с вектором ГМП, соответствующего временному периоду образования пород. Остаточная намагниченность создается магнитными материалами: оксидами железа и титана, которые в небольших количествах содержатся практически во всех породах (Киршвинк Дж. и др., 1989). Анализ палеомагнитных данных позволил установить как изменение ГМП по напряженности, так и изменение полярности вектора ГМП, т.е. инверсии. При инверсии дипольного геомагнитного поля сохраняются либо направление вектора поля, при снижении до нуля напряженности с последующей противоположной ориентацией поля, либо сохранение напряженности при повороте вектора ГМП на 180°. Средняя продолжительность периодов переполюсовки составляет около 10000 лет. Хронологическая шкала полярности за

последние 80 млн. лет, представленная на рис. 2, позволяет количественно оценить число инверсий ГМП для каждой геологической эпохи.

Процесс переполюсовки ГМП продолжается около 4000–5000 лет, и соответствующее снижение напряженности поля может быть равно данному интервалу или длиться в 2–4 раза больше.

Необходимо отметить, что с периодами инверсии ГМП достаточно хорошо коррелируют многие показатели эволюции биосистем. Так, было показано, что эпохи вымирания и возникновения различных видов морской микрофауны совпадают с инверсиями ГМП (рис. 3, 4).

В основе наблюдаемых корреляций, по мнению исследователей, возможны три типа объяснений: негеомагнитное событие привело как к изменению фауны, так и к инверсии ГМП; инверсии оказывали существенное влияние на окружающую среду организмов; изменяющийся характер магнитного поля оказывал непосредственное влияние на биосистемы. Кеннект и Уоткинс выявили зависимость между геомагнитными инверсиями и вулканической активностью и климатом планеты. Сискоу, Рейд и др. выдвинули гипотезу, согласно которой увеличение потока заряженных частиц в период инверсий в верхних слоях атмосферы могло вызвать уменьшение стратосферного озона и привести к увеличению ультрафиолетовой радиации. Следовательно, нераскрытые механизмы взаимодействия ГМП и эволюции организмов – одна из интереснейших проблем современного естествознания.

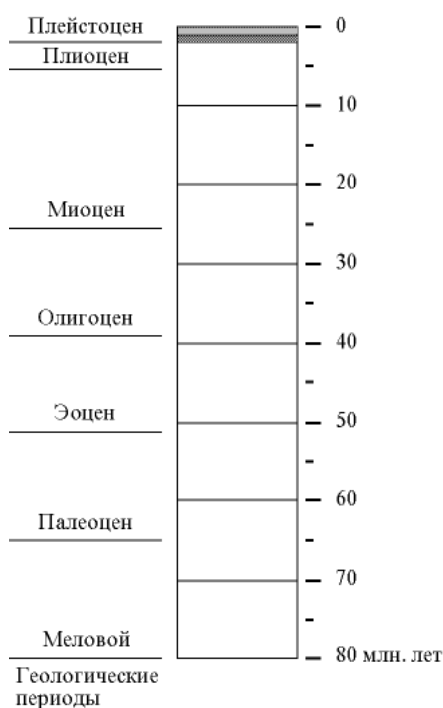


Рис. 2 Хронологическая шкала полярности последних 80 млн. лет, полученная по океаническим магнитным аномалиям. Интервалы нормальной (обратной) полярности показаны черным (белым) цветом. Слева от последовательности инверсии нанесены номера, соответствующие известным аномалиям, а справа дана хронологическая шкала в миллионах лет. Слева указаны геологические периоды (Heirtzler, 1968)

Область околоземного пространства, физические свойства, размеры и форма которой определяются магнитным полем Земли и его взаимодействием с потоками заряженных частиц от Солнца (солнечным ветром), называют магнитосферой, за счет давления потока плазмы солнечного ветра с дневной стороны дипольный характер ГМП искажается – оно сжимается в направлении Солнца, а на ночной стороне силовые линии ГМП вытягиваются в протяженный магнитный хвост диаметром до 40 земных радиусов. Таким образом, магнитосфера несферична – она простирается до расстояния около 10 земных радиусов в направлении на Солнце и на многие миллионы километров в противоположном направлении.

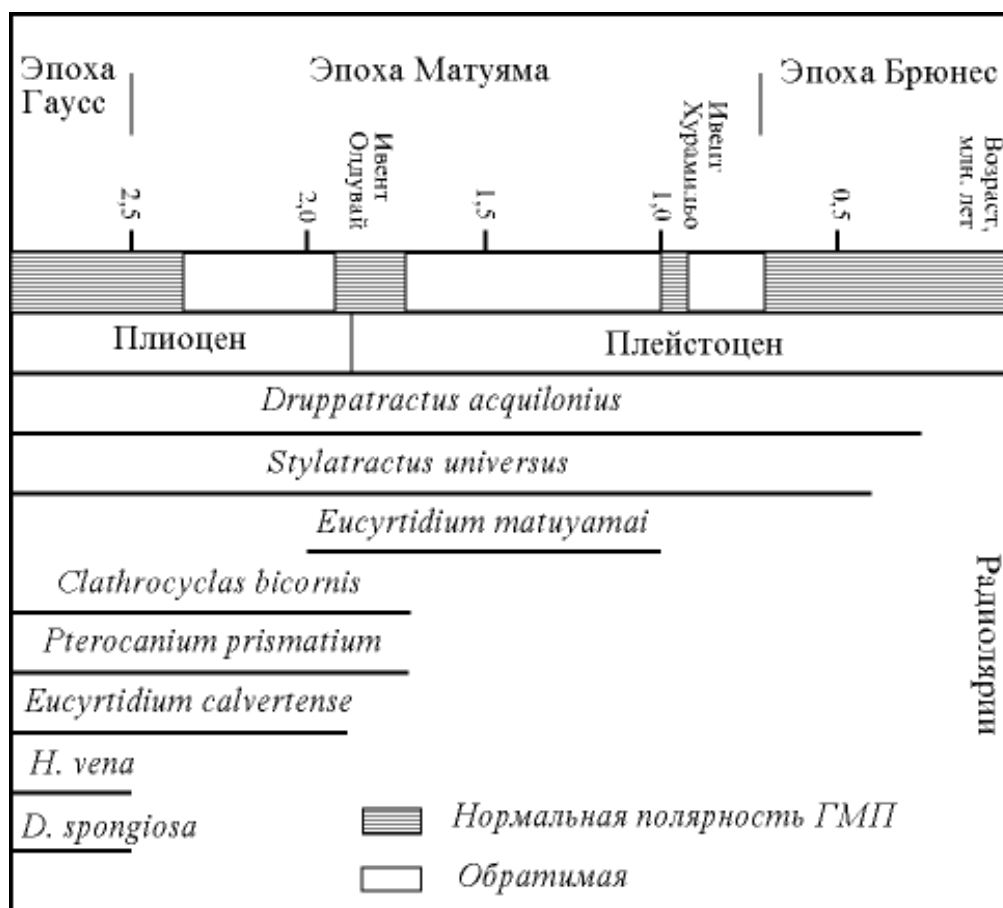


Рис.3. Последовательность геомагнитных полярностей для последних 2,5 млн. лет и палеонтологические данные по восьми видам радиолярий, вымерших за этот период (Haas, 1971)

Внутреннюю часть магнитосферы, расположенную в пределах диполеподобного ГМП (примерно до 3 радиусов Земли), называют плазмосферой. Концентрация частиц "холодной" плазмы в плазмосфере составляет примерно 10^4 в см^3 , т.е. на 2–3 порядка больше, чем во внешней части магнитосферы. Во внутренних областях магнитосферы магнитное поле удерживает, как в магнитной ловушке, потоки быстрых частиц с энергией в сотни кэВ и выше. Эти частицы образуют радиационные пояса Земли. Таким образом, магнитное поле Земли является магнитным экраном, который препятствует проникновению в биосферу заряженных космических частиц. Границу магнитосферы на дневной стороне называют магнитопаузой.

Напряженность поля в магнитопаузе зависит от параметров солнечного ветра и обычно составляет несколько десятков гамма (1 гамма = 10^{-5} Э).

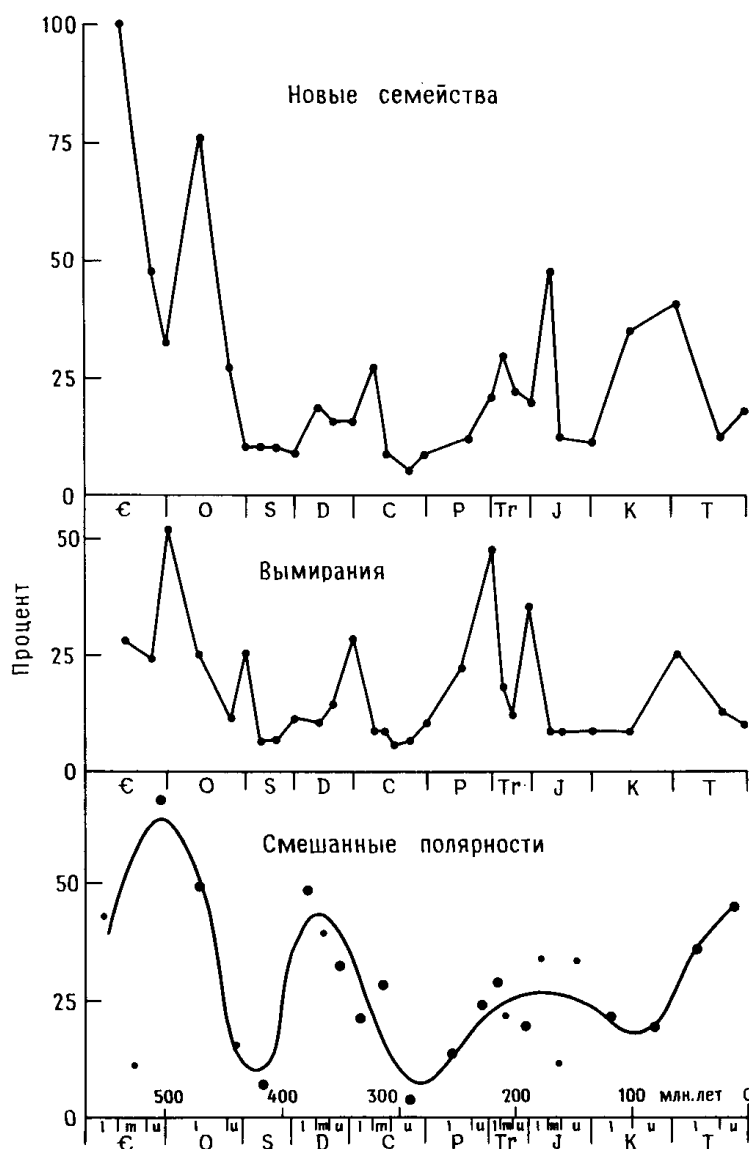


Рис. 4. Сравнение скоростей возникновения и вымирания фаунистических семейств, выраженное в процентах от существующих семейств (Newell, 1963), с относительными частотами инверсии в фанерозое, выраженное в процентах пород конкретной геологической эры, содержащих признаки смешанных (как обратной, так и нормальной) палеомагнитных полярностей (McElhinny, 1973).

Значительное увеличение плотности энергии в солнечном ветре приводит к магнитосферным бурям – неперiodическим вариациям ГМП.

Магнитные бури часто объясняют быстрым выделением энергии, запасенной в полях хвостовой части магнитосферы. Альтернативным объяснением является представление о магнитосферной динамогенерации ЭДС на границе магнитосферы: магнитные бури – резкие, неправильной формы колебания магнитного поля Земли – начинаются одновременно на всем земном шаре и имеют тенденцию к повторению через 27 сут. Поле изменяется по значению и направлению на несколько процентов за время от нескольких часов до нескольких суток (обычно магнитная буря продолжается от 6 до 12 ч). После окончания магнитосферной бури элементы земного магнетизма (склонение, наклонение и горизонтальная составляющая напряженности поля) постепенно возвращаются к своим нормальным значениям. Число и интенсивность магнитных бурь различны в разные годы. Периоды максимума бурь повторяются с интервалом примерно в 11,5 года. Магнитные бури сопровождаются появлением в верхней атмосфере полярных сияний, ионосферных возмущений, рентгеновского и низкочастотного излучений, возрастанием потока частиц в радиационных поясах, искажением магнитного поля Земли.

Периодические вариации магнитного поля Земли (переменное ГМП) порождаются токами в магнитосфере и ионосфере и характеризуются неустойчивостью. Все периодические вариации магнитного поля Земли имеют источник вне Земли. Геомагнитные вариации классифицируют по длине периода, что является одновременно классификацией по физическим причинам. Выделяются солнечно-суточные вариации, вызванные суточным движением Земли вокруг Солнца, лунно-суточные, изменяющиеся в диапазоне от 30 до 70 и от 1 до 5 гамма, годовые, циклические с периодом примерно 11,5 года, связанные с изменением солнечной активности, и др. Амплитуды всех периодических вариаций кроме солнечно-суточных составляют единицы угловых минут склонения и тысячные доли ампер на метр напряженности поля. Обтекание магнитосферы плазмой солнечного ветра с переменной плотностью и скоростью заряженных частиц, а также

прорывы частиц в магнитосферу приводят к изменению токовых систем в магнитосфере и ионосфере. Токовые системы, в свою очередь, вызывают в околоземном космическом пространстве и на поверхности Земли колебания ГМП в широком диапазоне частот (от 10^{-5} до 102 Гц) и амплитуд (от 10^{-3} до 10^{-7} Э). Колебания напряженности магнитного поля Земли называют также микропульсациями ГМП. На возникновение и величину микропульсаций влияют не только порывы «солнечного ветра», но также потоки космических частиц, особенно глубоко проникающие в ГМП в полярных областях, потоки метеоров, движение электрических зарядов в атмосфере, морские волнения и ряд других природных явлений.

Для описания временной динамики геомагнитной активности вводится ряд количественных индексов.

K – индекс 3-часового интервала, характеризует поток солнечных частиц, вызывающих изменения в токах, отражающихся на геомагнитной активности. Измеряется в баллах от 0 до 9: 1 = 5 нТл; 9 = 500 нТл;

S_g – коэффициент солнечной суточной вариации;

L – коэффициент лунной суточной вариации;

S_{fe} – коэффициент солнечных вспышек.

числа Вольфа – коэффициент прямо пропорционально зависимый от количества солнечных пятен.

Рассмотрим более подробно основные колебания магнитного поля Земли, которые получили названия микропульсаций (Александров и др., 1972). В настоящее время принята следующая классификация типов микропульсаций (табл. 1).

Таблица 1

Классификация различных типов микропульсаций ГМП ($1 \gamma = 10 \text{ Э}$)

Тип колебаний	Период, с	Частота, Гц	Тип микропульсаций	Максимальная напряженность

Дли- тельные квази- гармониче- ские	0.2 – 5	0.2 – 5	рс 1	0.5 – 1.4 γ
	5.1 –	0.1 –	рс 2	25 – 650
	10	0,196		m γ
	10.1 –	0.0222 –	рс 3	4 γ
	45	0.099		
	45.1 –	0.0666 –	рс 4	50 – 100
	150	0.0066		m γ
	150.1 –	0.00166 –	рс 5	50 – 100
Нерегу- лярные или импульсив- ные	1 – 40	0.025 – 1	рi 1	1 – 20 γ
	40 –	0.0066 –	рi 2	200 –
	150	0.025		1200 γ

Причины возникновения микропульсаций ГМП разнообразны: магнитооптические волны в ионосфере и нижней экзосфере, при взаимодействии порывов «солнечного ветра» с магнитосферой Земли; магнитные бури; циклотронные колебания ионов во внутреннем радиационном полюсе Земли; тормозное излучение электронов в зоне полярных сияний; потоки космических частиц, особенно глубоко проникающих в магнитное поле Земли в полярных областях; потоки метеоров; движение электрических зарядов в атмосфере; морские волнения (табл. 2).

Таблица 2

Интенсивность естественных флуктуаций в ГМП (Александров и др., 1972)

Частота, Гц	Интенсивность	
	горизонтальной составляющей (γ)	вертикальной составляющей (γ)
> 1	30	2
20	(15 - 150) · 10	(5 - 30) · 10

30	$(10 - 150) \cdot 10$	$(1 - 10) \cdot 10$
----	-----------------------	---------------------

Весь диапазон флуктуаций переменного электромагнитного поля условно может быть разделен на следующие поддиапазоны: ниже 5 Гц – микропульсации ГМП и теллурические токи; 5–50 Гц – резонансные частоты волновода Земля-ионосфера (8 Гц, $E \sim 100$ мкВ/м; $H \sim 30\text{--}150$ мГ; $W=10\ 10$ Вт/(м²·Гц)).

Основная причина возбуждения электромагнитных колебаний – разряды атмосферного электричества. После солнечных вспышек количество флуктуаций поля увеличивается в частотном диапазоне 5–70 Гц.

60 Гц – 3 кГц – диапазон ограниченный снизу частотой силовой сети Северо-Американского континента, сверху – нижняя критическая частота волновода Земля–ионосфера, обусловлен убывающей на данных частотах спектральной плотностью атмосфериков ($E \sim 30\text{--}50$ мкВ/м; $H = 1\text{--}10$ мГ).

3 – 50 кГц – диапазон волноводного типа распространения радиоволн в сферическом волноводе Земля–ионосфера и определяется также спектральными характеристиками атмосфериков (2 кГц $\sim 1,3$ мкВ/м; 10 кГц $\sim 0,6$ мкВ/м; 30 кГц $\sim 0,04$ мкВ/м).

Естественные электрические токи земной поверхности или теллурические токи нестационарного режима с направлением вектора э.д.с. на экватор. Средняя плотность теллурических токов в земной коре равна $2 \cdot 10^{-10}$ А/м²; $E \sim 0,3\text{--}10$ мВ/км. Интенсивность теллурических токов достаточно хорошо коррелирует ($R = 0,8$) с геомагнитными микропульсациями в области частот от 0 до 5 Гц.

В гидросфере наблюдаются гораздо более сложные электромагнитные процессы. Так в океане выделяют следующие компоненты: теллурические токи $\sim 3 \cdot 10^{-6}$ А/м² при градиенте поля 1 мкВ/км, во время магнитных бурь происходит увеличение градиента поля от 30 до 200 мВ/км. С глубиной океана плотность теллурических токов увеличивается линейно. Частотные

диапазоны от сотых долей герц и ниже. Индукционные токи возникают при движении морской и речной воды в магнитном поле Земли. Для средних широт при ГМП $\cong 40$ А/м, при скорости течения 1,03 м/с $E = 40$ мВ/км.

Диффузионные токи, обусловленные электромагнитными процессами при диффузии ионов между слоями с различной концентрацией. Напряженность электрического поля порядка 200; 400 мВ/м.

Поля грозового происхождения от атмосфериков находятся в частотном диапазоне от единиц герц до десятков килогерц. Перепад в широком диапазоне напряженностей от 30 кВ/м до 200 В/м с большим градиентом затухания в зависимости от глубины водного слоя.

Контрольные вопросы:

1. Какова напряженность ГМП?
2. Экологическая роль инверсии ГМП?
3. Структура магнитосферы?
4. Физическая природа магнитных бурь?
5. Что такое атмосферики?

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Развитие электроэнергетики, радио, телевидения, сотовой телефонии, спутниковых средств связи и радиолокационных станций породило большое число самых разнообразных источников ЭМП, охватывающих практически весь диапазон неионизирующих излучений (рис. 5). Необходимо отметить явно выраженную неоднородность в распределении ЭМП по амплитуде и частоте. Наиболее высокие уровни напряженности регистрируются вблизи электроэнергетических установок, теле- и радиовещательных станций,

промышленных объектов, радиолокационных станций, линий электропередачи и городов. Линии электропередачи (ЛЭП) в настоящее время занимают около 5% суши планеты, спутниковое телевидение, телефонная связь в мегагерцовом диапазоне постоянно или через короткие промежутки времени осуществляют облучение практически всей биосферы Земли. Повсеместная компьютеризация, создание компьютерных классов, офисов, компьютерных бирж приводит к значительному повышению фона ЭМП практически для всех возрастных групп.

В бытовых условиях, вероятно, наиболее высокий уровень ЭМП, достигающий пределов вредного для здоровья значения, можно наблюдать в семейной кухне: холодильник (50 Гц, 5–100 Э); СВЧ-печь (10–50 мкВт/см); электрокомбайн (50 Гц, 5–20 Э); электромиксеры (50 Гц, 5–10 Э); электрические чайники (50 Гц, 2–7 Э); переносной телевизор (50 Гц, 10–50 Э, $E = 1–10$ кВ/м); сотовый телефон (~ 400 МГц, 1,5–2 Вт) – далеко не полный перечень электромагнитных источников, воздействующих на «слабую» половину человечества в период беременности, в начальный период детства, это наиболее чувствительные к влиянию ЭМП периоды индивидуального развития организма человека (табл. 3).

Радиостанции уже в течение 60 лет создали постоянный устойчивый антропогенный ради фон, который в 10–100 раз, как минимум, превышает естественные флуктуации атмосфериков в этом диапазоне, что и дает нам возможность без помех слушать радиопередачи.

Высоковольтные линии электропередачи, типа ЛЭП-500, создают на уровне земли переменное электрическое поле (50–60 Гц) с напряженностью по электрической составляющей равной 10–15 кВ/м, а по магнитной – 0,1–0,15 Э при силе тока в фазе равной 1 кА (Плеханов, 1990).

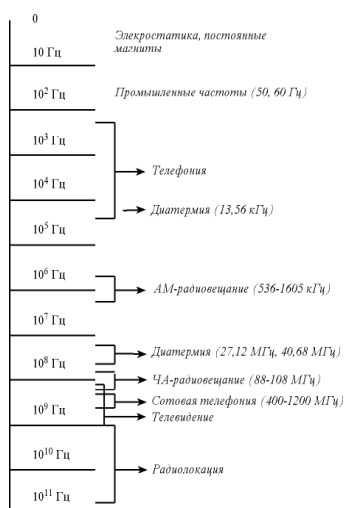


Рис. 5. Основные частотные диапазоны электромагнитных излучений антропогенной природы.

Таблица 3

Напряженность магнитного поля вблизи различных бытовых приборов на частоте 50 Гц

Приборы	Напряженность МП (Э.) в 5 см. от объекта	Напряженность МП (Э.) в 1 м. от объекта
Кухонные плиты	6 – 20	0.1 – 1
Электроплиты	1 – 6	0.1 – 0.6
Микроволновые печи	7 - 20	0.7 – 2
Посудомоечные машины	0.3 – 2	0.03 – 0.2
Холодильники	5 – 17	0.5 – 1.7
Стиральные машины	8 – 50	0.8 – 5
Сушка одежды	0.3 – 6	0.03 – 0.6
Кофеварка	1 – 10	0.1 – 1
Тостер	3 – 9	0.3 – 0.9
Электрокастрюли	1 – 3	0.1 – 0.3
Утюги	1 - 4	0.1 – 0.4
Электрические приспособления для открывания банок	10 – 200	1 – 20
Миксеры	6 – 70	0.6 – 7
Сместители	3 – 13	0.3 – 1.3
Пылесосы	20 – 80	2 – 8

Калориферы	1 – 18	0.1 – 1.8
Фены	1 – 200	0.1 – 2.0
Вентиляторы	2 - 30	0.2 – 3
Электробритвы	1 – 15	0.1 – 1.5
Телевизоры	5 – 100	0.5 – 10
Дрели	40 – 80	4 - 8
Электроплиты	25 – 100	2.5 – 10
Приспособления для удаления кухонных обросов	8 -25	0.8 – 2.5

Для борьбы с воровством в магазинах, музеях, библиотеках и аэропортах используются различные электронные системы. Такие устройства работают на частоте 0,1–10 кГц–1 МГц, при напряженности магнитного поля равной 1–10 Э. Профессиональное влияние МП сопряжено с работой вблизи оборудования при использовании сильных токов. Прежде всего, это различные типы сварочных машин, электросварка, системы индукционного нагрева и т.д. (табл. 4). По данным обследований (Вялов, 1974) установлено, что уровни напряженности МП в промышленных отраслях, использующих электролитические процессы, колеблются в пределах 40–146 Э.

Таблица 4

Профессиональные источники магнитных полей

№	Источник	Напряженность МП (Э.) на расстоянии 1м. от источника
1	Видеотерминалы	$2 \cdot 10^{-3}$
2	Сварочные дуги (0 – 50 Гц)	1 – 58
3	Устройства индукционного нагрева (50 Гц – 10 кГц)	9 – 650
4	Дуговая печь (50 Гц)	2 – 80
5	Индивидуальная мешалка (10 кГц)	2 – 5
6	Электромагнитная сварка (50 Гц)	5 – 17
7	Электролитические процессы (0 – 50 Гц)	80
8	Разделение изотопов (ПМП)	10 - 500

В радиочастотном и мегагерцевом диапазонах основными источниками электромагнитных излучений являются радио-, телевизионные и радиолокационные станции. Радионавигационные станции представлены несколькими типами: метеорологическими, гражданской авиации и военными. Все они создают достаточно высокую интенсивность ЭМП, прежде всего в районе их размещения. Модулированное по амплитуде и частоте поле, суммируясь с другими ЭМП антропогенного происхождения, создают новую, не свойственную биосфере, электромагнитную среду. С целью сопоставления естественных и антропогенных уровней ЭМП рассмотрим данные по гигиеническим нормативам ЭМП, представленные в табл. 5. Гигиенические нормативы можно рассматривать в плане оценки общего электромагнитного уровня, которого мы достигнем, практически повсеместно, в недалеком будущем. Следует отметить, что при разработке экологических нормативов существует тенденция к еще большему расширению уровней напряженности ЭМП.

Сравнительный анализ данных, представленных в табл. 5, позволяет убедиться в том, что существующие разрешающие уровни ЭМП в сотни, тысячи раз превосходят естественные уровни ЭМП. Такой парадоксальной ситуации не наблюдается ни по одному известному веществу или излучению. Такое превышение естественного уровня по любым другим техногенным компонентам возможно только в условиях специализированных лабораторий или полигонов.

Таблица 5

Уровни естественных ЭМП и гигиенические нормативы полей

Частотный диапазон	Уровни естественных ЭМП		Допустимые уровни техногенных электромагнитных полей		Уровни превышения (во сколько раз)	
	Н	Е	Н	Е	Н	Е
0	0.5 Э	130	80	15	1600	100000

		В/м	0 Э	кВ/м		
50 Гц	0.00001	30	20	0.5 –	2 ·	17 ·
	Э	мкВ/м	0 Э	15 кВ/м	1000000	1000000
0.03 –	0.00001	30	0.1	25	16 ·	8 ·
300 кГц	Э	мкВ/м	6 Э	В/м	1000	100000
0.3 – 3	1 ·	1	0.1	15	16 ·	1 ·
МГц	0.00001 Э	мкВ/м	6 Э	В/м	1000	10000000
3 – 30	0.00000	1	0.1	10	16 ·	100000
МГц	1 Э	мкВ/м	6 Э	В/м	10000	00
30 –	0.00000	0.1	0.0	3 В/м	3 ·	3 ·
300 МГц	1 Э	мкВ/м	3 Э		1000	10000000
0.3 –	4 · 0.00000001			10 мкВт/см ²		2 · 1000000000
0.7 гГц	мкВт/см ²					
0.7 –	5 · 0.0000001			10 мкВт/см ²		2 · 100000000
1.5 гГц	мкВт/см ²					
1.5 – 10	2 · 0.0001			10 мкВт/см ²		5 · 100000
гГц	мкВт/см ²					
10 – 37	9 · 0.001 мкВт/см ²			10 мкВт/см ²		1 · 10000
гГц						

Учитывая, что в реальных условиях и эти высокие нормативные уровни ЭМП очень часто превышаются, с экологической точки зрения ситуацию можно рассматривать на уровне экологической катастрофы планетарного масштаба, которая способна изменить саму направленность эволюционного процесса в биосфере и привести к непрогнозируемым последствиям, как для всего человечества, так и для биосферы.

ВЛИЯНИЕ ЭМП НА БИОСИСТЕМЫ

Многочисленные исследования низкочастотных ЭМП на живые системы целесообразно дифференцировать в зависимости от уровня их организации. Так у микроорганизмов изучались таксисы, рост, размножение, метаболизм, вирулентность и наследуемость изменений. В результате проведенных

исследований показано, что низкочастотные электрические и магнитные поля в диапазоне напряженностей по электрической составляющей до 1 кВ/м и по магнитной до 100 Э оказывают, как правило, стимулирующее влияние на рост, размножение, вирулентность, энергетические и обменные процессы. В то время, как ЭМП более высоких значений интенсивности, приводят к торможению биохимических реакций и угнетению жизнедеятельности микроорганизмов. Достоверных наследственных изменений при действии ЭМП у микроорганизмов не было выявлено. Переменные, импульсные и модулированные поля приводили к более выраженным эффектам по сравнению с постоянными.

К настоящему времени является экспериментально доказанным фактом то, что, естественно, ЭМП Земли экологически значимы для растительных объектов. Об этом свидетельствуют данные натурных наблюдений, прямые эксперименты с ориентированным относительно ГМП посевом растений и результаты опытов с экранировкой от ЭМП Земли растительных объектов (Травкин, 1971, 1978; Новицкий, Стрекова, Тараканова, 1971; Дубров, 1974; Новицкий, 1978). Исследования на растительных объектах проводились в широком диапазоне частотно-амплитудных характеристик ЭМП. В качестве объекта использовали рожь, овес, пшеницу, бобы, люпин, редис, свеклу, элодею, хлореллу, арабидопсис. В качестве реакций – различные морфометрические, биохимические, биофизические тесты с помощью которых авторы выявили ряд частых закономерностей. ГМП и ПМП во всем интервале исследуемых напряженностей являются биологически активным фактором, вызывающим изменения у растений по всем исследуемым показателям. Эти изменения не входят за рамки нормальных физиологических отклонений и укладываются в интервал 5 – 15%. При этом, наиболее характерными реакциями являются: ускорение роста корешков в однородных полях и замедление в резко неоднородных, среднестатистическое увеличение урожайности при повседневной обработке семян ПМП. Стимуляция роста корешков в интервале $40 - 8 \cdot 10000$ А/м

приблизительно пропорциональна логарифму напряженности ПМП, однако и в этом случае максимальный эффект не превышает 15 –25%. Эффект действия поля существенным образом зависят от выбора объекта, используемых тестов, условий проведения опыта. Особенно важную роль играют выбор сезона, физиологические свойства исследуемого растения, наличие дополнительных воздействий неэлектромагнитной и электромагнитной природы, включая ГМП.

Предпосевная обработка семян растений ПеЭП в диапазоне 500 В/м – 5 кВ/м стимулировала более раннюю всхожесть семян и последующие вегетационные процессы. В то же время ПеЭП 15 – 20 кВ/м повышают стерильность пыльцы растений и отрицательно сказываются на урожайности.

О значительной роли ЭМП в жизнедеятельности насекомых свидетельствуют многочисленные данные натурных наблюдений и результаты экспериментальных исследований по влиянию искусственных ЭМП на поведение и развитие. Поведение насекомых меняется в зависимости от электромагнитного состояния атмосферы, на ориентацию и положение тела в покое у некоторых насекомых оказывает влияние направление вектора ГМП (Becker, 1960; Чернышев, 1969, 1984 и др.). В районе ЛЭП изменяется пространственное распределение и поведение различных видов насекомых (Bindokas, Greenberg, Ganger, 1984; Еськов, Сергеечкин, 1985, Орлов, 1990 и др.). В последнее время появились конкретные экспериментальные данные об информационной связи между особями некоторых видов летающих насекомых посредством генерации и восприятия ими квазистатических ЭП трибоэлектрической природы (Еськов, Сапожников, 1976). У некоторых насекомых обнаружены выраженные магнитные свойства определенных структур тела, что может служить основой их ориентации в МП (Kirschnink, 1984 и др.).

Порог чувствительности к ЭП в диапазоне от 1 до 100 Гц, экспериментально определенный по поведенческим реакциям у *Drosophila melanogaster*, находится на уровне 200 В/м. В статических полях дрозофилы

ориентируют продольную ось тела параллельно направлению силовых линий ЭП. На включение поля мухи реагируют торможением двигательной активности. При малых напряженностях движение возобновляется через несколько минут действия поля. В сильных (25 кВ/м) полях состояние неподвижности может сохраняться часами, после выключения поля – двигательная активность восстанавливается. ПеЭП промышленной частоты действует в 1,5 раза более эффективно. Самцы более чувствительны к ЭП, чем самки (Чернышев, Афонин, 1978). В слабых ПеЭП, в диапазоне частот от 2 до 10 Гц, были обнаружены изменения поведенческих реакций различных видов насекомых. У жуков наблюдается увеличение двигательной активности, у мух, комаров, молей и бабочек – снижение на 20–30%. Прямоугольные импульсы ЭП более действенны, чем поля синусоидальной формы. Отмечается, что степень выраженности реакции на ЭП сильно варьирует в зависимости от времени суток и обстановки. Е.Т. Кулиным с сотрудниками (1977) проведены аналогичные исследования в диапазоне частот от 100 Гц до 800 МГц (Чернышев, 1984). Многочисленные наблюдения за поведением пчел проведены в зонах ЭП, создаваемых ЛЭП. Напряженность ЭП на участках, где были расположены опытные ульи, достигала величины от 3 до 10 кВ/м. Различные исследователи выявили однотипные изменения в поведении пчел: повышенную агрессивность, беспокойство, прополисование лоткового отверстия, повышение температуры в ульях, повышенное потребление пищи (на 20%), снижение работоспособности фуражиров, снижение продуктивности до 50% от контроля. Отмечается повышенная склонность к роению, потеря маток и маточников (до 50%). Выраженное изменение поведения наступает в основном в полях 4 кВ/м и выше. Экспериментами, проведенными в контролируемых условиях, установлены определенные закономерности, связанные с реакцией пчел и ос на ПеМП. Уровень чувствительности проводился по интенсивности и спектру звуков, издающих насекомыми. Установлено, что максимум чувствительности пчел и ос приходится на

частоту 500 Гц. На этой частоте пороговая чувствительность составляет для пчел 400–500 В/м, для ос – 30–50 В/м, то есть находится на уровне напряженностей природных ЭП. При изменении частот от 500 Гц до 10 Гц и до 1000 Гц чувствительность насекомых к ПеЭП уменьшается в 2 раза. На частоте 5000 Гц у ос порог возрастает в 4 раза, у пчел – в 12 раз. Рост напряженности поля до 15–18 кВ/м (на частоте 500 Гц) приводит к повышению двигательной активности. При напряженностях 20 кВ/м активность насекомых падает. Максимальный стимулирующий эффект наблюдается у рабочих пчел при напряженностях 7,5–10 кВ/м, у трутней – при 3–8 кВ/м. Молодые пчелы тоже чувствительны к ПеМП. Длительность воздействия приводит к адаптации. Воздействие ПеМП частотой 300–500 Гц, начиная с напряженности 1,5–2 кВ/м, влияет на внутригнездовой микроклимат, изменяя температуру и концентрацию углекислого газа. При воздействии полем напряженностью 140 кВ/м 50% пчел слетает с кормушки, при 800 кВ/м – улетают все пчелы (Сапожников, 1977). Об ощущении бабочками градиента ЭСП напряженностью 18 кВ/м свидетельствуют данные о том, что откладка яиц бабочками происходит преимущественно на внешней стороне пластин конденсатора, создающего ЭП (Edwards, 1961). В ЭСП напряженностью 2 кВ/м повышается двигательная активность личинок *Tenebrio molitor*. После выключения поля активность постепенно снижается (Fujiwara, Yokata, Amenuya, 1985).

В основе механизма восприятия насекомыми ЭП, очевидно, лежит явление образования на поверхности их тела зарядов трибоэлектрической природы. Установлено, что на теле активных рабочих пчел заряды достигают величины 50–80 нКл, на теле пассивных пчел – 1–3 нКл. При колебаниях брюшка пчела генерирует ПеЭП частотой 15 Гц, при взмахах крыльев – 160–400 Гц. Зарегистрированы колебания антенн у пчел в ЭП напряженностью 10 кВ/м. Во время брачного поведения самец яблочной плодовой мушки воздействует на самку ПеЭП частотой 68–76 Гц (Орлов, 1990). Искусственное ЭМП магнитной природы также оказывают влияние на поведение и

некоторые физиологические показатели жизнедеятельности насекомых. Слабые ПемП частотой 0,05 Гц увеличивают двигательную активность мух, ПМП отклоняют курс движения дрозофил в вертикальной плоскости. В ПМП напряженностью 4 кА/м многие насекомые (мухи, термиты, бабочки) реагируют торможением, замирая параллельно или перпендикулярно вектору поля (Becker, 1964).

Таким образом, ЭМП низкочастотного диапазона оказывают влияние на поведение насекомых, их физиологическое состояние и информационные отношения между особями.

ДЕЙСТВИЕ ЭМП НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

Изучение влияния статических и низкочастотных ЭМП на человека проводилось в трех направлениях: санитарно-гигиеническое и эпидемиологическое обследование контингентов лиц, подвергающихся воздействию полей на работе и в быту, терапевтическое применение С и НЧ ЭМП, исследования на добровольцах.

Широкое использование электрической энергии на производстве и в быту привело к тому, что практически все население подвергается действию ЭМП, напряженность которых во много раз превышает фоновые значения. Особенно значительно увеличилась интенсивность ЭМП на рабочих местах ряда энергоемких предприятий, вблизи линии электропередач, на электрифицированном транспорте. Гигиенические исследования проводились в двух вариантах: эпидемиологические исследования больших контингентов населения, проживающих вблизи ЛЭП или по своей профессии вынужденного какую-то часть времени работать в условиях действия поля, и санитарно-гигиеническое обследование персонала производств, на рабочих местах которых напряженность ЭМП существенно выше фонового.

При сравнительных эпидемиологических обследованиях лиц, проживающих вблизи высоковольтных ЛЭП (200 – 4000 кВ/м) и на удалении

от них более 125 м., достоверного влияния поля обнаружить не удалось. Другие исследователи отмечали у взрослых и детей, проживающих вблизи ЛЭП и подвергавшихся действию ЭМП, повышенную частоту встречаемости онкологических заболеваний. Более существенные, но неопределенные данные получены при анализе лиц электрорадиотехнических профессий, у которых чаще встречаются лейкемия и онкологические заболевания.

Специальные обследования работников электротехнических производств, вынужденных часть рабочего времени находить в электрических или магнитных полях, дали неоднозначный результат. Одни авторы обнаруживают у них при непродолжительной работе определенные изменения состояния, характеризующиеся наличием жалоб на плохое самочувствие, вялость и другие нарушения по типу астенического синдрома. Другие даже при длительной работе в более сильных полях отмечают лишь незначительные изменения, не выходящие за пределы нормы, или не наблюдают никаких отклонений.

Еще более спорные результаты получены при использовании ЭМП как терапевтического фактора. Слабыми импульсными ЭП с напряженностью единиц и десятков В/м лечат астму. Магнитные поля напряженностью от 500 до 16000 А/м достоверно излечивают рак губы. Достаточно широко и с продолжительным эффектом используются в медицине препараты «Полюс 1» и «Полюс 2», и большое количество магнитных устройств индивидуального и промышленного производства. Можно отметить, что, по мнению большинства авторов, ЭМП обладают ярко выраженным анальгезирующим, противовоспалительным, гипотензивным и антиастматическим действием. Особенно хорошие результаты получаются, когда врач явно или неявно применяет концепцию об адаптивных реакциях организма и с помощью ЭМП поддерживает больного в состоянии стойкой активации.

Последняя серия относится к экспериментальным исследованиям на добровольцах. Впервые действие МП на человека было зарегистрировано

Д'Арсонвалем в виде реакции фосфена. Суть его сводится к тому, что при воздействии на голову человека ПемП напряженностью свыше 16 кА/м в диапазоне частот 10 – 100 Гц или ИМП, начиная с одиночных импульсов, у испытуемого возникает ощущение зрительных образов в виде световых вспышек, цветных пятен, полос и т.д. В экспериментах с сенсорной индикацией МП установлено, что человек может субъективно воспринимать ПМП, начиная с напряженности 6400 А/м, ПемП 1 – 100 Гц – от 800 А/м и более, а ИМП – от 400 А/м. Воздействие ПМП напряженностью 24 – 32 вА/м на голову загипнотизированного человека вызывает эффект исчезновения внутренних галлюцинаций. На ЭЭГ регистрируется появление высокоамплитудных составляющих, уменьшается амплитуда основных ритмов. На ЭЭГ некоторых гипнотизируемых испытуемых зарегистрировано появление медленных волн при действии ПемП 0.16 – 16 А/м, 0.01 – 3 Гц. Изменение ЭЭГ зарегистрировано также при действии на голову человека ИЭП 200 Гц, 0.5 В/м. Воздействие ПМП 240 кА/м на голову испытуемого приводит к появлению в его ЭЭГ медленных волн, прекращающихся после снятия поля (Холодов, 1982).

В большей серии других исследований отмечается, что при действии на человека ЭМП напряженность от единиц В/м или А/м до десятков кВ/м или кА/м регистрируются разнонаправленные изменения величиной 2 – 30% от уровня контроля по ряду тестов: время реакции, частота сердечных сокращений, ЭЭГ, психологическое тестирование, условно-рефлекторная деятельность, ЭЭГ, сопротивление и температура кожи, артериальное давление и т.д. Некоторые авторы отмечают выраженные изменения отдельных функций человека при действии ЭМП малой и средней напряженности (20 кВ/м или 20 кА/м). Другие не наблюдают вообще никаких изменений, или же регистрируют слабые разнонаправленные флюктуации, не выходящие за пределы нормы в полях напряженностью 10 кВ/м и 10 кА/м (Плеханов, 1990).

Подводя итог исследованиям на людях, можно отметить, что серия гигиенических работ свидетельствует о биологической эффективности ЭМП, серия терапевтических – позволяет считать, что сравнительно слабые поля могут изменять состояние человека и способствовать его лечению. Экспериментальные исследования приводят к заключению, что ЭП (от долей В/м до 100 кВ/м) и МП (от долей А/м до 3200 кА/м) могут вызывать различные изменения многих функций, как правило, не выходящие за пределы естественных колебаний.

Контрольные вопросы:

1. Особенности влияние ЭМП на микроорганизмы?
2. Особенности влияние ЭМП на растения?
3. Роль ЭМП в физиологических процессах организмов?
4. Влияние НЧ ЭМП на человека ?

Глава II. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

А.Л. ЧИЖЕВСКИЙ – ОСНОВОПОЛОЖНИК СОВРЕМЕННОЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ

Появление первых идей электромагнитной экологии по времени совпадает с рождением радиотехники. Основателем идей, рассматривающих электромагнитное состояние Земли как один из главных

факторов периодических и эволюционных изменений в биосфере, является русский ученый А.Л. Чижевский. В соответствии с его взглядами течение всех жизненных процессов в биосфере тесно связано с периодической деятельностью Солнца, зависит от количества и качества поступающих на Землю электромагнитных излучений (Чижевский, Шишина, 1968). Закон периодичности в деятельности Солнца был открыт в прошлом столетии каноником Генрихом Швабе из Дессау. Швабе в течение 43 лет ежедневно регистрировал расположение солнечных пятен и установил периодичность в изменении количества солнечных пятен. Астроном Рудольф Вольф, систематизировал данные по солнечной активности начиная с 1600 г., установил наиболее отчетливый период солнцедетельности, равный 11 годам. Впоследствии были определены 6, 22, 33 и 80-летние циклы активности Солнца. В 1908 г. Хейл определил: напряженность магнитного поля пятен на Солнце составляет 2000–4000 гаусс, в то время как напряженность общего магнитного поля звезды не превышает одного гаусса. Магнитное поле Земли воспринимает и воспроизводит прохождение солнечных пятен через центральный меридиан Солнца и возникновение мощных хромосомных протуберанцев. Изменения магнитного поля Земли повторяются каждые 27 суток, соответствует периодам вращения солнечных пятен и наиболее четко повторяются каждые 11 лет. Периодическая активность Солнца оказывает влияние на степень ионизации атмосферы, электрическую проводимость, плотность, способность отражать радиоволны. Соответствующие изменения проявляются и в геофизических процессах Земли. Так, по мнению И.В. Максимова, с 11-летними и вековыми циклами коррелируют степень ледовитости арктических морей, колебания уровня океана, термический режим Гольфстрима, Норвежского и Баренцова морей, радиоактивность воздуха, напряженность атмосферного электричества, интенсивность грозовой деятельности, количество озона и сейсмическая активность.

Сопоставив статистические данные, А.Л. Чижевский показал, что эпидемии чумы, холеры, клещевого энцефалита, гриппа хорошо коррелируют с 11-летними солнечными циклами. А. Дэглас, измеряя толщину колец на гигантских спилах секвой в Южной Калифорнии четырехтысячного возраста, установил наличие 11-летнего либо кратному ему цикла годового прироста деревьев. Первые экспериментальные исследования на рост и развитие культуры тканей, семян растений и микроорганизмов экранирования, проведенные А.Л. Чижевским, доказали, что «проникающее излучение достигает биосферы» и что оно подавляет рост и размножение живых клеток.

Сопоставление циклов жизни африканской саранчи с периодической деятельностью Солнца позволило русскому энтомологу Н.С. Шербиновскому установить 10–13-годовалый цикл размножения пустынной саранчи. Интересно, что в глубокой древности за столетия до начала новой эры у китайцев, монгольских и тюркских народов, по данным Н.С. Шербиновского, существовал 12-летний цикл летоисчисления. Каждый год носил название тех или иных животных: год коровы, лошади, барана, барса, зайца, дракона и составляют основу современного азиатского календаря. Много лет назад кочевники установили, что самые сильные засухи, приводящие к массовому падежу скота – джуту, повторяются каждые 11–12 лет, вероятно, поэтому и возникла идея животного календаря.

В тридцатые года французские ученые: М. Фор, Г. Сарду, Г. Валло на основании обширного статистического материала установили, что прохождение пятен через центральный меридиан Солнца в 84% случаев совпадает с повышением смертности, инфарктами, инсультами и обострениями хронических заболеваний. Организованная ими первая в мире медицинская служба Солнца стала рассылать во многие больницы и клиники бюллетени о солнечных возмущениях. На основании анализа 200 тысяч случаев смерти от заболеваний мозга и нервной системы братья Дюльль выявили коррелятивную зависимость с геомагнитной активностью. К

аналогичным заключениям пришел и ученый Томского мединститута В.П. Десятов. По данным томских ученых, количество рожденных детей с болезнью Дауна коррелирует с числами Вольфа, в то же время, по сведениям американских ученых, в профессиональных группах, хронически подвергающихся влиянию СВЧ-полей, также наблюдается повышенная вероятность рождения детей с аналогичным заболеванием.

Л.П. Агуловой (1999) на основании многолетних исследований были выявлены статистически значимые зависимости между многодневными ритмами сердечнососудистой системы, электрической активностью мозга и космофизическими индексами.

В качестве космофизических показателей использовались:

W – числа Вольфа;

R – плотность потока радиоизлучения Солнца на частоте 2800 МГц;

Кл – интенсивность нейтронной компоненты космических лучей, нормированной на атмосферное давление;

K_s – суточный 3-часовой индекс геомагнитной активности;

A_p – планетарный индекс геомагнитной активности;

F_2 (to F_2) – критическая частота ионосферного слоя;

V – скорость движения Луны по геоцентрической орбите;

G – среднесуточные значения приливных вариаций сил тяжести для координат г. Томска.

По мнению автора, ритмические процессы центральной гемодинамики в большей степени коррелируют с ритмами индексов: W , R и G . С мозговой гемодинамикой все индексы, в равной степени, за исключением V . С многодневными ритмами вегетатики: R , Кл и G . Последующий статистический анализ между степенью синхронизации физиологических функций и космогеофизическими факторами, позволил Л.П. Агуловой сформулировать следующие положения. У больных пациентов, для которых характерно усиление межфункциональных связей, наблюдалась гиперсинхронизация, т.е. более четкая зависимость физиологических

колебаний от космогеофизических. В то время как у относительно здоровых пациентов с асинхронными межфункциональными связями взаимозависимость биологических ритмов с факторами среды носила случайный характер.

В современном представлении о солнечно-земных связях можно выделить три рабочие гипотезы: 1 – непосредственное влияние солнечная активность оказывает на метеорологические и геофизические факторы, которые затем воздействуют на биологические процессы; 2 – электромагнитные и корпускулярные излучения, устанавливающиеся в периоды солнечной активности, оказывают непосредственное влияние на биосферу и биологические процессы; 3 – наряду с известными физическими излучениями в период активной деятельности Солнца происходит излучение-Z, по Чижевскому, которое не регистрируется современными приборами, но является биологически активным.

Несомненной заслугой А.Л. Чижевского является развитие им представлений о глобальной биосферной природе активности всего электромагнитного спектра излучений Солнца. Исследования в этой области, статистическое накопление материала способствовали более глубокому пониманию экологической роли электромагнитных полей в эволюции биосферы.

Контрольные вопросы:

1. Значение научных работ А.Л. Чижевского в разработке основ электромагнитной экологии?
2. Как оценивается солнечная активность?
3. Солнечная активность и физиологическое состояние организма?

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РОЛЬ ФЛУКТУАЦИЙ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЭМП

Экспериментальное подтверждение глобального влияния солнечной активности на кинетику химических реакций было получено итальянским ученым Дж. Пиккарди (1967). Сливая вместе прозрачные растворы солянокислого хлористого висмута и воду, ученый получал молочно-белый коллоидный раствор, частицы которого оседают, и он вновь становится прозрачным. Используя период оседания хлористого висмута в качестве тест-реакции, Дж. Пиккарди установил коррелятивную зависимость между скоростью реакции и активностью Солнца. Более 300 тыс. опытов, поставленных по инициативе ученого в течение 15 лет по всему миру, подтвердили зависимость химической реакции от солнечных ритмов. Неясным оставался вопрос о природе физических факторов, изменяющих время химической реакции.

Выяснением роли электромагнитных полей, оказывающих влияние на оседание хлористого висмута, и занялись томские ученые Г.Ф. Плеханов и А.М. Опалинская (1990).

В первой серии экспериментальных исследований была установлена достоверная корреляционная связь между колебаниями геомагнитного поля (ГМП), оцениваемого по значениям местных 3-часовых К-индексов, и временем реакции оседания хлористого висмута. Во второй серии опытов изучался эффект экранирования от внешних электромагнитных полей: 1 – удалением электрических промышленных установок; 2 – сварным

железным экраном – коэффициент ослабления $\sim 10^2$; 3 – четырехслойным пермалловым экраном с коэффициентом ослабления $\sim 10^6$.

Результаты исследований, представленные на Рис. 6, свидетельствуют о статистически достоверном влиянии экранирования на ход реакции оседания хлористого висмута, что выражается в стабилизации времени реакции, т.е. уменьшении размаха колебаний в пермалловом экране на 40 %.

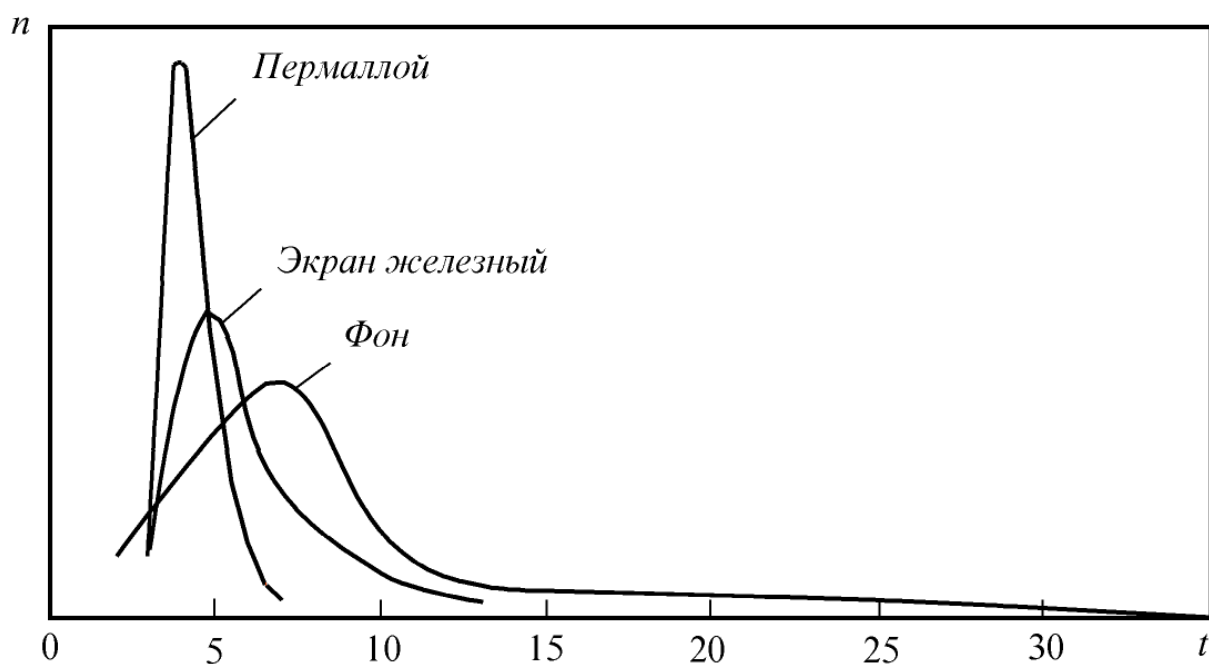


Рис. 6. Влияние экранирования от магнитного поля на скорость оседания оксихлорида висмута в воде

ордината – частота встречаемости замеров в серии; абсцисса – время в мин (Плеханов, 1980)

В третьей серии экспериментов исследовалось влияние слабых электромагнитных полей, амплитудное значение которых соответствовало максимальным значениям естественных геомагнитных возмущений $\sim 50\text{--}1000 \gamma$ ($1 \text{ Э} = 10^5 \gamma$). Усредненные результаты, представленные в табл. 10, позволяют заметить, что слабые искусственные магнитные поля оказывают влияние на ход реакции Дж. Пиккради. Интересно, что с увеличением частоты ПемП чувствительность реакции заметно уменьшается.

Аналогичные результаты были получены Г.Ф. Плехановым и А.М. Опалинской при излучении реакции аплютинации.

H. Konig, L. Crempl-Lamprecht (1959) показали, что переменные магнитные и электрические поля естественного происхождения изменяют скорость роста молочнокислых бактерий и пивных дрожжей. F. Sisler и F. Senftle (1961) обнаружили, что пульсации геомагнитного поля оказывают влияние на метаболизм и послойное распределение микрофлоры в морских водоемах.

Сотрудниками Крымской обсерватории под руководством Б.М. Владимировского было высказано предположение, что возникающие во время солнечной активности у поверхности Земли коротко периодические геомагнитные колебания (КПК) в диапазоне частоты 0,002 Гц – 5 Гц оказывают влияние на физиологическое состояние микроорганизмов.

Совместно проведенные с Ю.Н. Ачкасовой исследования выявили достоверную коррелятивную взаимосвязь между КПК и размножением бактерий.

Таким образом, в результате многочисленных и тщательно проведенных исследований установлено, что солнечная активность вызывает флуктуации ГМП, которые, в свою очередь, оказывают влияние на физико-химические и биологические процессы. Следовательно, естественный электромагнитный фон Земли можно рассматривать в качестве одного из системообразующих экологических факторов (Карташев, 2000).

БИОГЕННЫЙ МАГНЕТИЗМ

Представление о том, что геомагнитное поле является экологическим фактором среды, необходимым для нормального функционирования биосферы, впервые высказанное томским ученым П.В. Савостиным (1928), подтверждается и современными магнитобиологическими исследованиями. В 1975 г. Блейкмор открыл бактерии, непосредственно реагирующие на ГМП

и перемещающиеся вдоль силовых линий, т.е. обладающие магниточувствительностью или магнитотаксисом.

Таблица 6

Минералы железа, образующиеся вследствие биохимических процессов

Минералы	Таксоны	Механизм минерализации	Локализация минерала ((в типичных случаях)
1. Оксиды Магнетит (Fe ₃ O ₄)	Бактерии Простейшие Моллюски Членистоногие Хордовые	Минерализация опосредованная остовом Неизвестен Минерализация опосредованная остовом Неизвестен Минерализация опосредованная остовом	Внутриклеточные магнитосомы Неизвестна Внеклеточно, в зубцах хитонов В брюшке медоносных пчел В надрешчатой кости тунца, в голове голубя
Ферригидрит (5Fe ₂ O ₃ · 9H ₂ O)	Бактерии Грибы Растения Животные	Минерализация опосредованная остовом Аналогично Аналогично Аналогично	В бактериоферритиновых мицеллах В ферритиновых мицеллах В мицеллах фитоферритина В ферритиновых мицеллах
Лепидокрокит (δ-FeOOH)	Губки Моллюски	Биоиндуцированная минерализация Минерализация опосредованная остовом	В спонгиновых гранулах В зубцах хитонов
Гетит (α-FeOOH)	Моллюски	Минерализация опосредованная остовом	В зубцах блюдечек
Аморфные оксиды трехвалентного железа	Бактерии Простейшие Кольчатые черви	Неизвестен Неизвестен Минерализация опосредованная	Непостоянная/неизвестная В цементе фораминифер

	Моллюски	остовом Неизвестен	В цементе трубок полихет В желудочных пластинках брюхоногих
Аморфный ильменит	Бактерии	Биоиндуцированная минерализация	На поверхности кожи голотурий
2. Сульфиды Пирит (FeS ₂)	Бактерии	Биоиндуцирован ная минерализация	Внеклеточная
Гидротро илит (FeS · nH ₂ O)	Бактерии	Биоиндуцирован ная минерализация	Внеклеточная
3. Сульфа ты Ярозит KFe ₃ [(SO ₄) ₂ (OH) ₆]	Бактерии	Биоиндуцирован ная минерализация	Внеклеточная, показана только в лабораторных условиях
4. Фосфа ты Аморфный гидрат фосфата трехвалентног о железа	Кольчатые черви Моллюски Иглокожие	Минерализация опосредованная остовом Минерализация опосредованная остовом Аналогично	В грудных щитках видов <i>Sternaspis</i> В зубах хитонов В кожных гранулах голотурий

В основе магниточувствительности различных организмов лежит процесс биоминерализации, т.е. совокупность биохимических реакций, в результате которых организмы образуют твердые минеральные включения. Образование магнетита, обладающего ферромагнитными свойствами, происходит с помощью специализированных биохимических систем, механизм которых кодируется геном бактерий (Frankel, 1980). Микроорганизмы формируют кристаллы магнетита с размерами от 0,05 до 0,1 мкм, которые соответствуют одиночному магнитному домену. В свете современных представлений процесс биоминерализации характерен для

широкого класса организмов (табл. 6) и лежит в основе геотропизма и магниторецепции.

Так, в пресноводных водоемах обнаружены бактерии различных морфологических типов, обладающих способностью перемещаться в направлении к южному полюсу. В морской воде содержатся микроорганизмы типа кокковидных бактерий с диаметром ~ 2 мкм, зеленоватые шаровидные с диаметром около 5 мкм и яйцевидные с размерами 15 мкм (Энрико и др., 1989). Для всех этих микроорганизмов $(mV_0/kT) > 1$, следовательно, магнитотаксис представляет собой более эффективный механизм направленного перемещения организмов, чем хемотаксис. К тому же случайные, месячные, годовые вариации ГМП, обусловленные солнечной активностью, содержат информацию о географической широте и времени, а локальные магнитные аномалии могут быть использованы в качестве ориентиров при миграциях животных.

Известно, что железо играет ведущую роль в обменных процессах, начиная от переноса кислорода гемоглобином и кончая цитохромными структурами клетки. Как правило, количество растворимого двухвалентного железа невелико. Естественно, что в процессе эволюции у организмов сформировались механизмы накопления железа в железозапасающих структурах. Существуют, по крайней мере, два различных механизма минерализации железа (Lowenstam, 1981). В случае биоиндуцированной минерализации минерал образуется вследствие взаимодействия конечных продуктов метаболизма организма с окружающей средой. В другом случае – «минерализации, опосредованной органическим остовом», имеются специальные пространственные структуры в организме животного и биохимические реакции, обеспечивающие и контролирующие процесс минерализации. Так, у моллюсков внутренний компонент аналогичной специализированной структуры состоит из белка типа фиброина или хитина, который покрыт слоями вещества с повышенной кислотностью. Эти поверхностные слои являются носителями центров кристаллизации,

обеспечивают соответствующую ориентацию кристаллографических осей и регулируют рост кристаллов. В эволюционном аспекте первым, вероятно, возник механизм биоиндуцированной минерализации железа в докембрее около 2,4 млрд. лет назад. Начиная с раннего кембрия возникает механизм минерализации железа, опосредованный органическим остовом, который широко распространяется среди самых различных групп животных в течение фанерозоя. Следовательно, механизм образования современного биогенного магнетита возник на ранних стадиях эволюции организмов, что является важным доказательством экологической и эволюционной роли электромагнитных факторов естественной среды.

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИЙ БИОСИСТЕМ В МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

К настоящему времени накопилось сравнительно большое количество данных, свидетельствующих о том, что многие биологические объекты способны воспринимать вектор геомагнитного поля.

Этому в высшей степени интересному вопросу были посвящены исследования Ф. Брауна и его сотрудников, работающего в Северо-западном университете США. Объектом исследования служили планарии, улитки и некоторые другие животные, обнаружившие высокую чувствительность к слабым магнитным полям. Эти животные могли различать компасные направления в отсутствие обычных ориентиров, например освещения и т.п. Опыты проводились в специальном садке, при выходе из которого находилась площадка, разделенная на секторы. Во время опыта отмечался сектор, куда выползали или передвигались животные. С помощью искусственного магнита создавалось слабое магнитное поле, лишь немногим отличавшееся по напряженности от естественного; при этом силовые линии поля располагались в продольном или поперечном направлении по отношению выхода садки. Экспериментальное МП создавалось с помощью

стрешневого постоянного магнита, укрепляемого в гнездах под садком на определенном расстоянии и в нужном для данной серии опытов направлении.

В результате проведенных опытов показано, что подопытные животные (планарии, моллюски) способны ориентироваться в пространстве, различать географическое направление. В зависимости от времени суток моллюски движутся: утром западнее заданного (северного) направления, а затем их движение начинает отклоняться к востоку по мере приближения к полудню. К вечеру движение моллюсков снова имеет западное направление. В искусственном МП, в четыре раза превышающем по напряженности геомагнитное (1,7 Э), направление движения моллюсков не меняется при сохранении полюсности магнита, хотя угол отклонения от средней линии возрастает. Однако реакция эта зависит от времени суток: в геомагнитном поле эффект более заметен в полдень, а в поле искусственного магнита – в полночь.

Такой сложный характер движения моллюсков определяется многими факторами: основными из них являются положение Солнца (солнечные сутки) и направление магнитного меридиана.

Опыты показали, что чувствительность планарий и моллюсков к изменению направления магнитного поля достигает максимума в пределах от 0,1 до 0,5 Э. Следует отметить, что моллюски обладают своеобразной инерцией, которая выражается в том, что после воздействия горизонтальным полем, более сильным, чем геомагнитное, животные реагируют на поле Земли более слабым поворотом на запад, чем до воздействия. Эффект воздействия поля сохраняется в течение некоторого времени (по крайней мере 3–5 мин) после того, как прекращено действие поля.

Р.Д. Пальмером, профессором Иллинойского университета США, проведены аналогичные опыты с колониальной водорослью *Volvox*. Поставлены три серии опытов, в которых использовались 6916 вольвоксов. В I серии около 90 вольвоксов помещались в алюминиевом «загоне», ориентированном на юг в нормальном магнитном поле Земли (0,17 Э). Выход

из «загона» разделен по кругу на секторы по 10° . Направление на юг отмечено цифрой 0, отклонение к востоку и западу – соответственно от + 8 до – 8. Изменение ориентации водорослей наблюдалось с помощью бинокулярной лупы. При этом отмечался сектор, в который передвигалась водоросль.

Вольвоксы удерживались в нужном месте прибора узконаправленным пучком света (водоросль обладает положительным фототаксисом). Во II серии опытов подключалось магнитное поле с горизонтальной составляющей 5 Э, направленной на юг. В III серии опытов МП той же напряженности было направлено на запад.

В результате проведенных исследований установлено, что в магнитном поле Земли угол отклонения вольвоксов составлял $4,6^\circ$ (I серия). Во второй серии, когда прикладывалось дополнительное МП, параллельное ГМП, угол поворота составлял уже $6,6^\circ$ (т. е. увеличивался на 43 %), а в третьей серии (дополнительное поле 5 Э направлено поперек направлению ГМП) угол увеличивался до $11,5^\circ$ (т. е. увеличивался на 150 % по сравнению с I серией, на 75 % – со второй). опыты выявили высокую чувствительность вольвоксов к слабому магнитному полю и к направленности его магнитного потока.

В СФТИ проведена серия исследований по выявлению биологических особенностей в реакциях дрожжевых грибов при действии магнитных полей, сравнимых по напряженности с ГМП (Карташев, Калюжин, Мигалкин, 1978; Мигалкин, Калюжин, Карташев, 1979; Карташев, 1980, 2000). В качестве тест-объекта использовались дрожжи (*Scaccharomyces cerevisiae*), интенсивность обменных процессов которых, оценивали по количеству выделившегося углекислого газа. опыты проводились при парном параллельном контроле в термостабилизированных условиях.

На первом этапе определялись чувствительность исследуемой реакции к постоянному магнитному полю (ПМП) и зависимость характера ответных реакций от пространственной ориентации вектора ПМП. Во второй серии опытов исследовались частотно-амплитудные характеристики дрожжевой

культуры в частотном диапазоне от 0,01 Гц до 100 кГц. В третьей серии изучалось влияние сложных частотно-зависимых ЭМП.

В результате исследования влияния постоянных магнитных полей (ПМП) на интенсивность брожения дрожжей при значениях напряженности поля 0,12; 0,25; 0,5; 1; 2; 4; 8 и 16 Э установлено: статистически достоверное изменение реакции наблюдается в области 0,5 Э. Эффекты, зависящие от ориентации вектора ПМП, находятся в области 0,5–2 Э; увеличение напряженности поля выше 4 Э приводит к ускорению брожения независимо от ориентации вектора ПМП (рис. 7). В зависимости от угла наклона вектора поля выявлены следующие зависимости: при ориентации вектора ПМП параллельно вектору ГМП (геомагнитного поля) наблюдается ускорение брожения дрожжей, в случае противоположной ориентации – торможение (рис. 8). Следовательно, в зависимости от величины напряженности ПМП качественно изменяется характер ответных реакций биосистем: 0,5–2 Э – эффекты зависящие от пространственной ориентации вектора поля, больше 4 Э--эффекты независимые от ориентации ПМП. Аналитическое выражение развития ответных реакций в зависимости от напряженности поля предложено было И.В. Мигалкиным в виде теоретических зависимостей, представленных на Рис. 9.

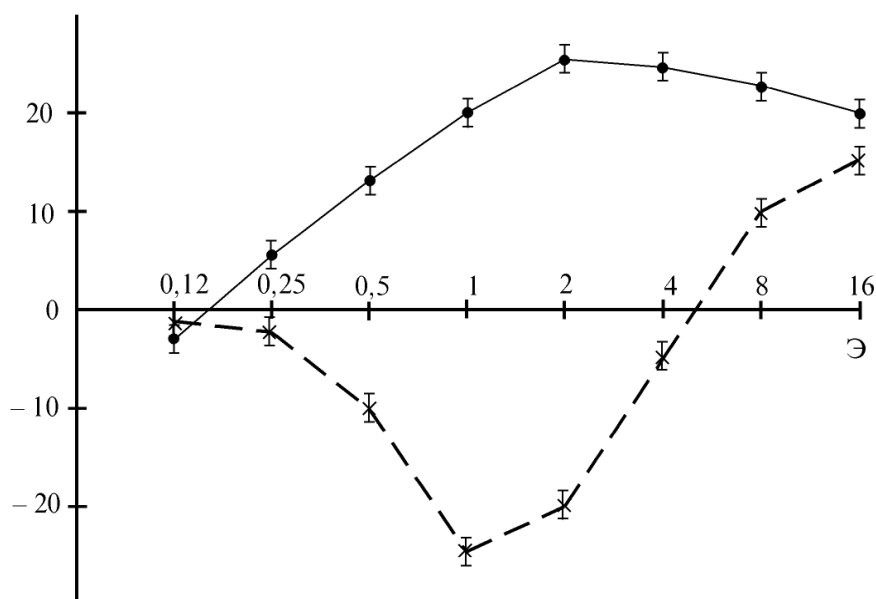


Рис. 7. Изменение среднестатистических показателей интенсивности брожения дрожжей при действии постоянного магнитного поля (ПМП):

————— – ПМП, направленное параллельно ГМП (0°);

- - - - - ПМП, направленное антипараллельно ГМП (180°) и горизонтально

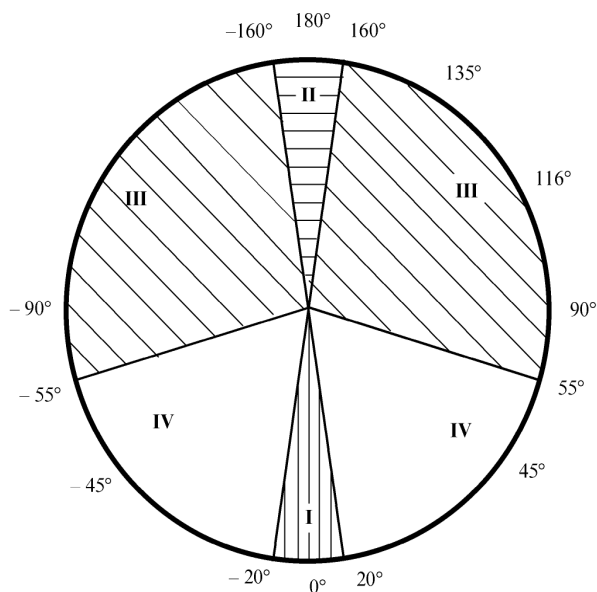


Рис. 8. Зависимость интенсивности брожения дрожжей от ориентации вектора ПМП:

0° – направление вектора ПМП вертикально вниз;

180° – направление вектора ПМП вертикально вверх;

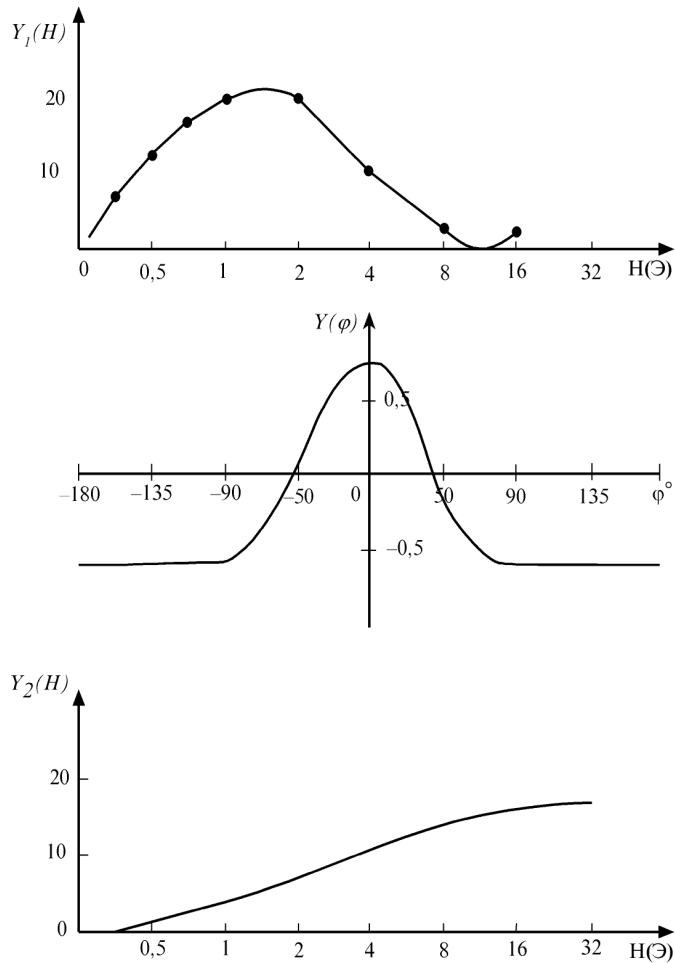


Рис. 9. Характер теоретических зависимостей $y_1(H)$, $y(\varphi)$ и $y_2(H)$

Первый тип ответных реакций существенно зависит от ориентации вектора поля и характеризуется увеличением эффекта в области 0,5–2 Э с последующим затуханием ~ 8 Э (рис. 9, $y_1(H)$). Процессы такого рода аппроксимируются зависимостями типа:

$$y_1(H) = a \cdot H \cdot e^{-\epsilon H},$$

где H – напряженность ПМП; a и ϵ – константы.

С учетом эффектов, зависящих от ориентации ПМП (рис. 9, $y(\varphi)$) получается дополнительное выражение для

$$y(\varphi) = K e^{-c\varphi^2} - 1,$$

где φ – угол рад; c – коэффициент анизотропности биообъекта.

Следовательно, характер ответных реакций первого типа, зависимый от пространственной ориентации вектора ПМП, может быть представлен в виде

$$y_1(H \varphi) = aH e^{-cH} (K e^{-c\varphi^2} - 1).$$

Второй тип ответных реакций биосистем, биосистемы характеризуются постепенным ускорением брожения дрожжей с выходом на плато при напряженности порядка 8 и 16 Э (рис. 9, $y_2(H)$) и может быть представлен в виде

$$y_2(H) = A(1 - e^{-gH}),$$

где H – напряженность ПМП; A и g – константы.

В принципе можно согласиться с мнением Ю.И. Новицкого (1973) о том, что в диапазоне значений магнитных полей, сравнимых с ГМП, характер ответных реакций биосистем развивается по специфическому типу. В данном случае специфичность подразумевает экологическую целесообразность развития реакций в зависимости от векторной характеристики поля, приобретенную в процессе эволюции. При увеличении напряженности ПМП характер ответных реакций биосистем, препятствующий влиянию полей, по своей напряженности выходящих за пределы экологической валентности, является защитным и рассматривается в качестве неспецифического типа развития адаптивных реакций. Можно сформулировать экологическое правило:

Если напряженность искусственно создаваемого ПМП одного порядка со средней напряженностью геомагнитного поля (0,5 Э), то характер ответных реакций биосистем существенно зависит от пространственной ориентации вектора поля, превышение соответствующего уровня по

напряженности приводит, как правило, к развитию однотипного характера ответных реакций независимо от направления вектора поля.

Экспериментальные результаты, полученные при действии переменных магнитных полей (ПеМП) при напряжениях от 0,06 до 2 Э в области фиксированных частот: 0,01; 0,1; 10; 50; 100; 200 и 400 Гц на интенсивность брожения дрожжей, позволили считать, что характер ответных реакций практически не зависит от частоты поля. Для удобства последующего анализа среднестатистическая кривая зависимости ответных реакций исследуемой биосистемы от напряженности в частотном диапазоне 0,01–400 Гц представлена на рис. 10 *а*. Сравнение полученной зависимости с данными по влиянию разнонаправленных постоянных магнитных полей (ПМП) (рис. 10 *б*) на скорость брожения дрожжей позволяет заметить, что при значениях напряженности ПМП равных: 0,25; 0,5; 1 и 2 Э, результирующая кривая, полученная в результате алгебраической суммации двух кривых ПМП, аналогична изменениям ответных реакций дрожжей под влиянием ПеМП (рис. 10, *а*).

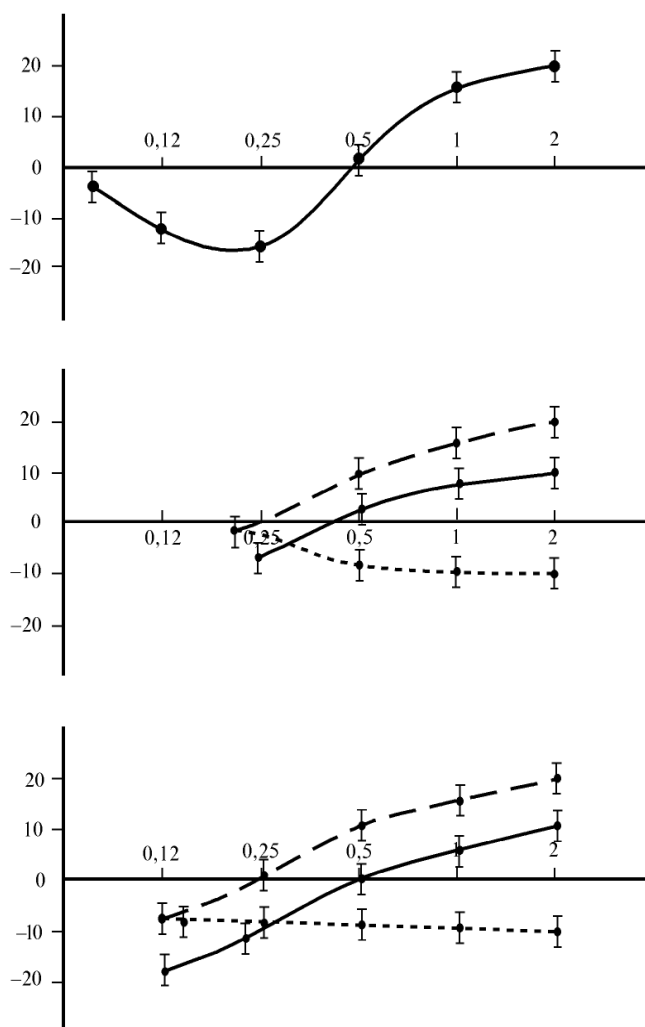


Рис. 10. Изменения интенсивности брожения дрожжей при действии магнитных полей: абсцисса – напряженность поля, Э; ордината – разница в количестве CO_2 между опытной и контрольной сериями:

а – изменение интенсивности гликолиза дрожжей при действии ПемП с частотами: 0,01; 0,1; 10; 50; 100; 200 и 400 Гц;

б – изменение интенсивности брожения дрожжей при влиянии разнонаправленных ПМП: ----- вниз; - - - вверх; ——— результирующая кривая;

в – влияние ПемП, разнонаправленных полупериодов на брожение дрожжей с частотами 0,1 и 50 Гц: ----- ПемП, направленные вниз; - - - - ПемП, направленные вверх; _____ результирующая теоретическая кривая.

В связи с тем, что при действии ПМП в области напряженности 0,5 Э происходит в зависимости от ориентации вектора поля ускорение или замедление брожения дрожжей, а под влиянием ПеМП $\sim 0,5$ Э изменений не наблюдается, была высказана гипотеза о суммации разнонаправленных полупериодов ПеМП. Гипотеза основывалась на предположении о том, что под влиянием синусоидальных ПеМП в частотном диапазоне 0,01–400 Гц изменения в интенсивности брожения, вызываемые в первом полупериоде колебаний, нивелируются противоположно направленным полем во втором полупериоде, приводя, таким образом, к нейтральному суммарному эффекту. Следовательно, биосистема дрожжевых грибов воспринимает переменные магнитные поля аналогично восприятию постоянных разнонаправленных магнитных полей.

Аналогичная алгебраическая сумма характерна и для напряженностей – 0,25; 1 и 2 Э. С целью проверки гипотезы проведены экспериментальные исследования по влиянию однополярных сигналов, образующихся в результате однополупериодного выпрямления. Среднестатистические данные, представленные на рис. 10, в, и полученная результирующая кривая хорошо согласуются с высказанными предположениями. Действительно, в частотном диапазоне 0,01–400 Гц при напряженностях, соизмеримых с ГМП (0,12; 0,25; 0,5 и 1 Э), при действии разнонаправленных ПеМП наблюдаются аналогичные зависимости в развитии ответных реакций биосистем как при действии разнонаправленных ПМП так и синусоидальных ПеМП. В связи с тем, что выявленные нами закономерности прослеживаются до частот, равных 400 Гц, микроинтервалы времени, в пределах которых восприятие переменных магнитных полей обусловлено экологически сложившимся биологическим механизмом восприятия постоянного геомагнитного поля, не превышают 10^{-3} с.

Необходимо отметить, что фазность эффектов под влиянием ПеМП в большей степени зависит от величины и направленности отклонения суммарного поля от средней напряженности ГМП. Экологическое значение

средней напряженности земного поля ($0,5 \text{ Э}$) заключается в том, что его величина является в экологическом отношении точкой отсчета, отклонения от которой в ту или иную сторону приводят к изменениям суммарной интенсивности универсальной для биосистем реакции, как гликолиз. Подтверждением высказанного положения являются и следующие обобщенные нами эмпирические закономерности:

а) характер ответных реакций биосистемы под влиянием вертикально ориентированных ПемП аналогичен суммарному действию разнонаправленных ПМП;

б) характер ответных реакций биосистемы при действии горизонтально направленных ПемП аналогичен суммарному влиянию горизонтально направленных ПМП. Возможным является положение о том, что в процессе эволюции у живых организмов сформировалась основанная на биогенном магнетизме специализированная физиологическая система, отслеживающая отклонения в электромагнитном фоне и соответственно изменяющая биохимические процессы в биосистемах. Проведенные исследования подтвердили представление о том, что значения напряженности и векторной направленности магнитного поля Земли являются экологически значимыми факторами в эволюции биосферы.

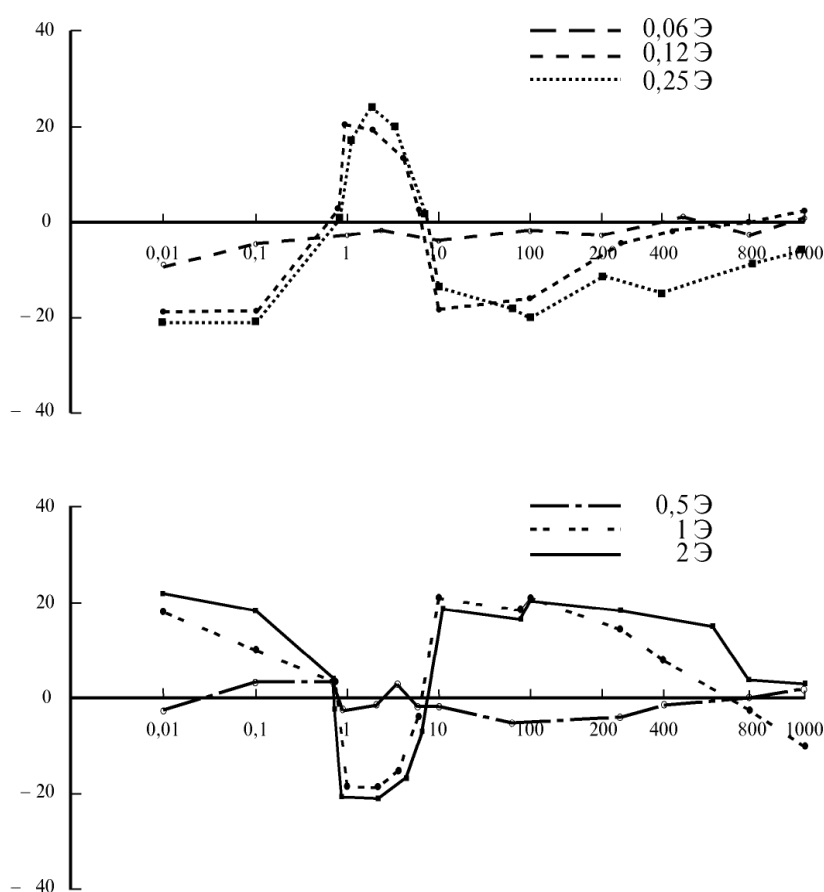


Рис. 11. Амплитудно-частотные характеристики изменений показателей скорости реакции в зависимости от частоты ПеМП при фиксированных напряженностях 0,06; 0,12; 0,25; 0,5; 1; 2 Э.

Представленные на рис. 11 амплитудно-частотные зависимости изменения интенсивности брожения дрожжей при действии ПеМП в диапазоне частот от 0,01 до 1000 Гц достаточно хорошо иллюстрируют характер ответных реакций биосистемы в низкочастотном диапазоне ЭМП. Последующее расширение частотного диапазона до 100 кГц позволило выявить квазирезонансные изменения интенсивности гликолических процессов дрожжей, приуроченные к определенным частотным диапазонам (рис. 12). Наблюдаемые изменения проявлялись при амплитудном значении ПеМП, равном 1 Э, не имели фазных зависимостей от напряженности поля, не зависели от пространственной ориентации вектора ПеМП. Естественно, что наблюдаемые изменения в реакциях дрожжевых грибов в области

частот больше 1000 Гц были отнесены к другим функциональным системам дрожжей.

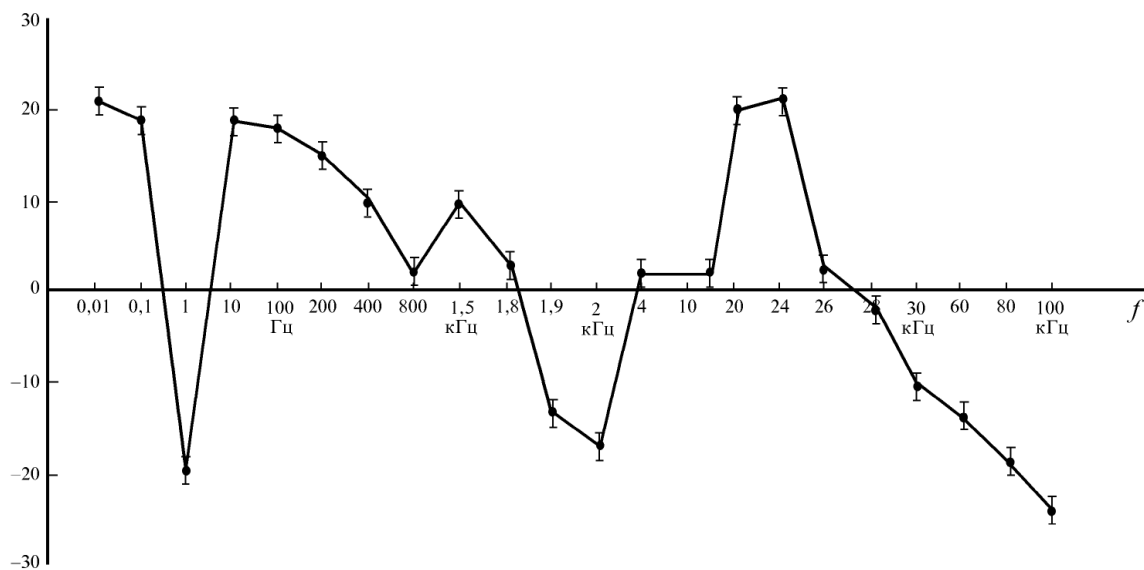


Рис. 12. Изменения интенсивности брожения дрожжей в зависимости от частоты ПемП при напряженности, равной 1 Э:

X – частота (f) действующего ПемП;

Y – величина эффекта в условных единицах

Контрольные вопросы:

1. Что такое биоминерализация?
2. Как животные ориентируются по ГМП?
3. Экологическое значение ГМП?
4. Биологические механизмы магниточувствительности?
5. Каковы особенности влияния низкочастотных МП на биосистемы?

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВЛИЯНИЯ ЭМП АНТРОПОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА БИОСИСТЕМЫ

Развивая положение Ж.Б. Ламарка о том, что конечной целью человеческой деятельности является разрушение живой природы, а затем и самих себя, следует выделить два основных направления, в которых человечество наиболее активно разрушает и трансформирует природную среду: получение все большего количества энергии и глобальное, ничем не ограниченное, развитие информационных электронных средств связи. Если в отношении первого направления негативные последствия распространения атомной энергетики не вызывают сомнения, то интенсивно увеличивающийся уровень электромагнитных полей вызывает беспокойство только у специалистов. Технократическая ограниченность, реализуемая в создании все большего количества телевизионных каналов, компьютерных сетей, сотовых телефонов и других электронных средств связи, привела к созданию в последние 50 лет новой электромагнитной среды, нехарактерной для биосферы. Как известно, эволюция биосферы на протяжении более чем 3,5 млрд. лет происходила в естественном низкочастотном диапазоне ЭМП, в то время как современное антропогенное увеличение электромагнитного фона происходит в высокочастотном и сверхвысокочастотном диапазонах частот. Сложность экологической оценки последствий такого повышения уровня ЭМП заключается в отсутствии контрольных районов на нашей планете. Попытаемся представить новую, созданную человеком, электромагнитную среду в первом приближении.

Электромагнитные поля промышленной частоты 50–60 Гц, которые излучают подстанции, электроустановки, линии электропередач, занимаемая площадь которых составляет 5% поверхности суши и сформировавшиеся волны которых, без существенного затухания, многократно огибают Землю, суммируясь друг с другом и создавая самые причудливые конфигурации по напряженности и частоте. Радиоволновой диапазон, превышающий

естественный фон в 100 и 1000 раз, также неоднократно огибающий Землю, благодаря наличию волновода Земля – ионосфера, затем телевизионные станции, имеющиеся в каждом городе и излучающие ЭМП в высокочастотном диапазоне в зависимости от своей мощности, облучающие подвластные им регионы. Метрологические, обзорные, авиационные и военные радиолокационные станции, излучающие в диапазоне $3 \cdot 10^9$ – $3 \cdot 10^{11}$ Гц. Не надо забывать, что каждое государство с помощью радиолокационных станций отслеживает свои воздушные границы при взаимообразном облучении территории друг друга. Станции наведения баллистических ракет и системы ПВО, которые круглосуточно осуществляют боевое дежурство в сверхвысоком диапазоне частот. Добавьте к этому спутниковое телевидение, сотовые телефоны, коротковолновые передатчики служебного и личного пользования и получите некоторое общее представление об электромагнитном смоге, который пронизывает всю биосферу и нарастает в геометрической прогрессии с каждым годом. Естественно, что в данной ситуации какая-либо экологическая оценка возможна только по уровням интенсивности между условным опытным районом и контрольным. Особенностью биологического влияния ЭМП является не существенная зависимость от уровней интенсивности, если энергетические параметры поля не приводят к непосредственному разрушению биосистемы, аналогичному приготовлению пищи в СВЧ-печке. Естественно, что наиболее высокий уровень и широкий частотный диапазон ЭМП концентрируются в больших городах, где поля несомненно оказывают влияние на психику людей, уровень стрессированности, раковые заболевания и т.д. В принципе можно говорить об «электромагнитной наркомании», о своего рода допинговой, стрессирующей дозе ЭМП, без которой трудно объяснить телефономанию, телевизороманию и компьютероманию. Широкое использование компьютерной техники создало угрозу комплексного облучения ЭМП как молодого подрастающего поколения, так и наиболее интеллектуально развитой части популяции человечества. При

работе дисплеев совместно с излучением оптического диапазона генерируются электростатические поля, ультразвук и ЭМП радиочастотного диапазона. Дело в том, что при сравнительно небольшой общей энергии радиочастотная область дисплеев характеризуется широким спектральным диапазоном (10 кГц – 26 ГГц). Хроническое влияние ЭМП дисплеев приводит к развитию функциональных расстройств: головные боли, утомляемость, нарушения артериального давления, катаракты, кожные поражения в виде зудящей сыпи и шелушения на лице (Савин, 1987).

При оценке экологической роли ЭМП используется гигиенический подход, основанный на определении биологической эффективности условно выделенных частот для организма человека. Методологической основой таких исследований, по мнению М.Г. Шандалы (1986), является проведение комплексных физиологических острых, подострых и хронических опытов на лабораторных млекопитающих и наблюдения на людях в реальных и экспериментальных условиях. Влияние на организм рассматриваемого уровня ЭМП относится к неблагоприятным в тех случаях, когда: а) физиологические отклонения при действии ЭМП статистически достоверно отличаются от контрольных вариаций и превышают пределы $\pm 26\%$ колебаний показателей для данного периода года. К неблагоприятным изменениям относятся также и стойкие, сохраняющиеся в течение месяца отклонения, находящиеся в пределах физиологической нормы; б) скрытые нарушения равновесия организма с внешней средой типа сужения адаптационных возможностей, выявляемые при помощи функциональных проб. Следовательно, при гигиеническом нормировании ЭМП оценочными критериями действия на организм ЭМП являются функциональные компенсаторные изменения, а не патологические. В случае, когда уровень воздействия поля приводит к патологическим нарушениям, вводится регламентации по сокращению времени пребывания человека в аналогичных условиях. Принципиальное отличие экологического нормирования от гигиенического заключается в том, что в экологическом аспекте ЭМП

действуют постоянно и хронически, разрушая наиболее неустойчивые виды организмов. Влияние на биосистемы комплексное включает суперпозицию различных частот, химические, радиоактивные, природные и другие факторы среды.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ЭМП НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Под низкочастотным диапазоном в электромагнитобиологии подразумевают ЭМП с частотами от 0 до 1000 Гц. Существующие в настоящее время санитарные нормы допустимых уровней ЭМП относятся к постоянным полям и 50-герцовому диапазону. Так, в 1977 г. Министерство здравоохранения СССР приняло предельно допустимый уровень для производственного воздействия постоянного магнитного поля, который не должен превышать на рабочем месте 8 кА/м (0,01 Тл). В США Министерством энергетики издан документ, предусматривающий следующие уровни ПМП в условиях производства: 0,01 Тл в течение 8 ч на все тело; 0,1 Тл в течение 1 ч на весь организм; 0,1 Тл в течение 8 ч при действии на кисти рук; 1 Тл, период 1 ч на руки.

В СНГ относительно напряженности электростатического поля принят уровень 15 кВ/м на поверхности радиоэлектронной и бытовой аппаратуры, игрушек, одежды и отделочных материалов.

Для переменного магнитного поля (ПеМП) промышленной частоты в России допустимый уровень на рабочем месте не должен превышать 200 Э. В США регламентация допустимых уровней влияния ПеМП на человека оценивается исходя из напряженности поля, индуцирующего определенную плотность тока в организме. Считается, что плотность индуцированного тока 1 мА/м² не вызывает вредных эффектов в организме. Плотность тока 10 мА/м² может вызвать вредные эффекты в зависимости от частоты поля, при этом наблюдается явление магнитофосфена – возникновения вспышек света у человека с закрытыми глазами (больше 5 мТл). При плотности

индуцируемого тока 1000 mA/m^2 происходит фибрилляция желудочков сердца человека. Влияние радиочастотных полей не должно превышать уровня поглощённой электромагнитной энергии равной 1 Вт/кг .

Относительно уровней воздействия переменных электрических полей промышленной частоты в России действует нормативный документ, утверждённый в 1982 г., – «Санитарные нормы и правила защиты населения от воздействия электрического поля, созданного воздушными линиями электропередач переменного тока промышленной частоты». В качестве предельно допустимых уровней приняты следующие значения напряженности электрического поля:

внутри жилых помещений – $0,5 \text{ кВ/м}$;

на открытой территории зоны жилой застройки – 1 кВ/м ;

в населенной местности: земли городов, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселкового типа, в сельских населенных пунктах и на территории огородов и садов – 5 кВ/м ;

на участках пересечения высоковольтных линий с автомобильными дорогами – 10 кВ/м ;

в незастроенной местности, доступной для транспорта, и с/х угодья – 15 кВ/м ;

в труднодоступной местности и на выгороженных участках – 20 кВ/м .

Анализ вышеприведенных регламентирующих нормативов-уровней низкочастотных полей позволяет прийти к заключению, что ни в одном случае, как в российской, так и международной практике, не рассматриваются проблемы экологической оценки ЭМП. Создается впечатление, что растительность и животный мир при общей продолжительности линий сверхвысокого напряжения, равной 7500 км в СНГ и более 100000 км в Западной Европе, занимающие площадь более 5% всей поверхности, находятся как бы вне зоны влияния низкочастотных ЭМП. Естественно, что все это далеко не так и одно из первых и комплексных экологических исследований влияния переменных электрических и

магнитных полей было проведено в Сибири на базе научно-исследовательского института биологии и биофизики Томского государственного университета в 1980–1990 гг.

Экологические исследования проводились по трем основным направлениям: 5–10-летние наблюдения в природных условиях под действующими линиями электропередач ЛЭП-500; полевые наблюдения в условиях полигона, где искусственно создаваемая напряженность поля в зависимости от задач исследования варьировала от 10 до 80 кВ/м и в лабораторных условиях.

ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОД ЛЭП-500

Систематические комплексные полевые наблюдения по влиянию электромагнитных факторов ЛЭП-500 проводились начиная с 1980 по 1994 г. в лесостепной зоне Южной Сибири на летнем стационаре в с. Ломачевка Кемеровской области. Прежде всего рассмотрены нарушения почвенного и растительного покрова при прокладке просеки и строительстве ЛЭП-500.

Почвенный покров просеки представлен серыми лесными почвами и светло-серыми глеевыми в верхней части склона. Светло-серые элювиально-глеевые со вторым гумусовым горизонтом почвы расположены в верхней и нижней частях склона. Дерново-подзолистые почвы занимают среднюю часть склона. Дно и борта балки выстилают дерново-глеевые почвы. На лессовидных карбонатных отложениях в нижних частях склона расположены серые лесные почвы. Дерново-подзолистые почвы приурочены к древней переотложенной или частично сохранившейся коре выветривания с остатками латеритного панциря и крупнозернистыми песками. Для бурых суглинков покровных отложений характерны серые лесные и светло-серые элювиально-глеевые почвы.

Нарушения почвенного покрова при прокладке просеки и строительстве ЛЭП-500 охватывают практически все представленные на просеке почвы.

Для учета нарушений использовалась карта масштаба 1:1000. Просека размечалась с помощью нивелированных ходов. Степень и характер воздействий на почвенный покров оценивались по остаткам почвенных горизонтов. За основу индикации нарушений взяты качественные признаки. Минимальными нарушениями считались перемешивания, рыхления, уплотнения гумусового плодородного горизонта A_1 . Средняя степень нарушений определялась в случае полного снятия гумусового горизонта с обнажением элювиальных горизонтов (A_2 , A_{gl} , $A_{BГ}$). К сильным нарушениям относились обнажения переходного (A_2 , B_i) и текстурного иллювиального (B_i) горизонтов. Отдельно выделялись участки, где почва уничтожена полностью. В случае насыпного материала оценивались его мощность и принадлежность к плодородным горизонтам (A_1 , $A_1 A_2$). Участки с однотипными нарушениями оконтуривались, и внутри их определялся состав нарушений по занимаемой площади.

Наиболее сильному механическому воздействию подвержен почвенный покров при прокладке просеки и раскорчевки. До 84% мощных нарушений приходится при прокладке просеки. Остальные нарушения (16%) связаны с установкой опор и натяжением проводов ЛЭП. В верхней части склона наиболее сильно пострадали края просеки, куда сваливались деревья и почвенный материал. Нарушениями захвачены серые лесные и светло-серые почвы. Наиболее сильно пострадали дерново-подзолистые и светло-серые почвы средней и нижней частей склона. Особенно мощные нарушения связаны с легкосуглинистыми и лессовидными отложениями.

Общий фон нарушенных участков составлял 30143 м², или 46,2% от площади просеки. Площадь участков, где мощных нарушений более 70%, равняется 26570 м², что составляет 40,8%. Вблизи опор площадь нарушений в среднем составляет 2155 м². Установлено, что ненарушенных участков на просеке осталось всего лишь 5,4% от общей площади, 49% от площади просеки занимают участки со средней степенью нарушенности почвенного покрова.

В пределах полигона, на территории, не затронутой сооружением просеки, расположены преимущественно сосново-березовые крупнотравные леса. Кустарниковый ярус практически не выражен, только в небольшом количестве встречается шиповник майский. В травостое преобладают виды лесного крупнотравья: василистник малый, борец северный, орляк обыкновенный, купальница азиатская и др. В нижнем ярусе способны доминировать костяника, осока и др. Повышенные участки в основном заняты березово-сосновыми сообществами, в подросте преобладает сосна, в травяно-кустарничковом ярусе, как правило, доминируют осока или черника.

Лесные поляны, являющиеся, по-видимому, результатом рубок, заняты крупнотравными травяными сообществами, достигающими полутораметровой высоты и имеющими 80–100% проективного покрытие. Здесь обильный борщевик рассеченный, бодяк разнолистный, борец северный, живокость высокая, орляк обыкновенный, василистник малый, чемерица Лобеля, скерда лировидная, володушка золотистая, чина Гмелина и др. По понижениям сосново-березовый древостой, как правило, сменяется березово-осиновым с выраженным подлеском из осинового подроста и ивы. В травостое начинают преобладать лабазник вязолистный, осока дернистая, вейники, луговик дернистый и др.

Растительность самой просеки к настоящему времени имеет неравномерно-мозаичный характер распределения. Мертвопокровные участки чередуются с растительными пятнами, существенно различающимися по видовому составу и структуре. Что обусловлено как особенностью состояния исходных сообществ, так и характером и интенсивностью антропогенного воздействия. В пределах полигона имеются несколько типов нарушений исходных сообществ: от оторжения древесного яруса, не сопровождающегося нарушением травяно-кустарничкового и почвенного покровов (преимущественно по краю просеки и небольшими фрагментами на самой просеке), и до полного уничтожения исходного БГЦ с

нарушением косной составляющей, отдельные пятна по всему полигону, большие площади под опорами.

В первом случае возможно длительное существование отдельных фрагментов былых сообществ (травостоя) практически без изменения их видового состава (вейниковые и папоротниковые пятна). Отдельные виды, представленные в исходном фитоценозе, единично начинают выходить в доминанты, другие сокращают степень своего участия в сложении сообщества. Уменьшается обилие видов, принадлежащих к лесному фитоценозу. Увеличиваются виды лесолуговые и луговые, виды, имеющие более ксерофильную природу и более требовательные к почвенному богатству, имеющие рыхлокустовую, универсальную либо пучковатую корневую систему. У представленных видов увеличивается проективное покрытие, высота побегов, образуется больше количество генеративных побегов.

Там, где воздействие сопровождалось сильным нарушением или уничтожением травостоя, происходит интенсивное заселение освободившихся или нарушенных участков 1–2-летними сорными видами (ярутка полевая, щетинник зеленый, жабрей и др.). В ряде случаев образовавшимися пионерные агрегации, а также эксплерентами, способными на незанятых участках давать всплеск фитомассы, но в обычных условиях не конкурентоспособными. Степень участия видов этих групп в структуре сообществ свидетельствует о величине его нарушенности, о завершении процесса формирования сообщества.

Практически все выделы на просеке имеют сильно нарушенные фрагменты (следы тракторных гусениц, волокни и т.п.) с содраным верхним слоем почвы. Эти участки, иногда занимающие до 80% выдела, характеризуются уменьшением почвенного богатства, из-за образования локальных понижений и уничтожения дернины. Механические нарушения способствовали расширению диапазона присутствия в сообществах видов, принадлежащих к различным экологическим группам: от ксерофитов до

гигромезофитов по фактору активного увлажнения и от олиготрофов до мегатрофов по фактору почвенного богатства.

На просеке происходят интенсивные фитоценозообразующие процессы. В зависимости от степени нарушенности сообщества находятся на разной стадии формирования. Слабое возобновление подроста и увеличение доли луговых дерновидных злаков позволяет предположить, что при достаточно небольшом регулирующем воздействии со стороны человека (выпас, скашивание травостоя в фазу цветения разнотравья) возможно формирование высокопродуктивных травостоев лугового типа, препятствующих восстановлению исходных лесных сообществ. Следовательно, строительство ЛЭП приводит к разрушению естественных биоценозов.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ФАКТОРА линий электропередач.

ЛЭП представляет собой трехпроводную линию. Изоляторы, на которых подвешены провода, закреплены на металлических опорах высотой 27 м. Расстояние крайних проводов от центрального провода составляет 15–16 м. Проведенные на уровне 1 м измерения напряженности электрического поля под ЛЭП и теоретические расчеты представлены на рис. 13. Необходимо отметить, что растения достаточно хорошо экранируют переменное электрическое поле, что наглядно представлено на рис. 14.

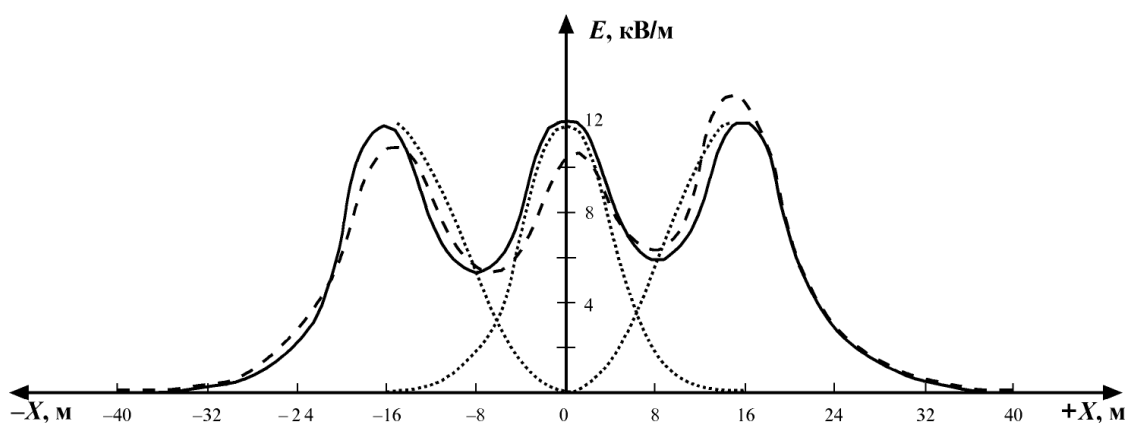


Рис. 13. Напряженность электрического поля под ЛЭП-500 в зависимости от расстояния от центрального провода

— расчетная кривая по формуле

$$E = E_- + E_0 + E_+ = E_{\max} e^{-\kappa(10-x)^2} + E_{\max} e^{-\kappa x^2} + E_{\max} e^{-\kappa(-16-x)^2},$$

где $E_{\max} = 12 \text{ кВ/м}$; $\kappa = 0,02$;

..... — E_- , E_0 , E_+

— x — экспериментально измеренные значения

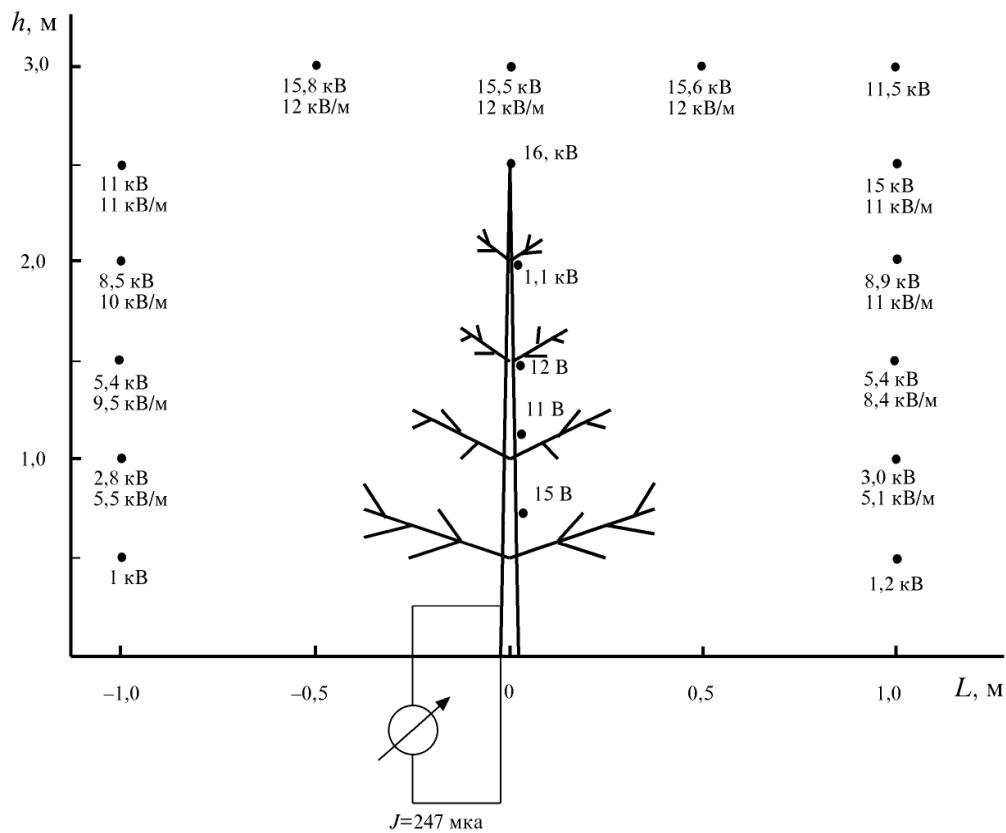


Рис. 14. Изменение потенциала и напряженности электрического поля под ЛЭП-500 вблизи отдельно стоящего дерева (Орлов, 1990)

В результате проведенных исследований установлено, что на подавляющее большинство исследуемых показателей различных представителей растительного и животного мира, а также на почву и почвенную микрофлору электрическое поле (ЭП) ЛЭП не оказывает существенного влияния. К числу таких тест-объектов относятся следующие.

Почва: ее структура, морфология, трещиноватость, расположение и мощность горизонтов, электрические свойства, количество орштейнов, а также почвенная микрофлора. Растения: наличие и обилие различных видов в опытных и контрольных биоценозах; морфометрия овса, пшеницы, подроста сосны, мышиного горошка, лютика, естественных злаковых; урожайность овса и пшеницы. Беспозвоночные животные: наличие и обилие червей, пауков, педобионтов и герпетобионтов; количество муравейников, их заселенность, динамика численности различных летающих насекомых, перемещающихся под ЛЭП на высотах от 0 до 4 м. Птицы: характер миграций, направление и динамика перелетов, посадки на опоры и нулевой провод, наличие естественных гнезд, заселенность скворечников. Млекопитающие: поведение крупных и диких животных (коровы, свиньи, овцы, лошади, медведи, олени, зайцы, лисы); наличие и обилие мелких грызунов, их морфология, аномалии развития, поведение.

Обнаружено влияние ЭП ЛЭП-500 на следующие показатели. Мелкие птицы облетают токонесущие провода на расстоянии около 1 м. Крупные птицы делают иногда присадки на токонесущий провод, но никогда на него не садятся. Под проводами ЛЭП в скворечниках уменьшается величина кладки яиц, увеличивается эмбриональная и постэмбриональная смертность, меняется динамика развития птенцов, что приводит в целом к снижению успешности гнездования на 8–12%. Кровососущие комары меньше нападают на человека. У мышиного горошка повышается на 16% частота встречаемости недоразвитых соцветий и на 15–27% чаще нарушается микроспорогенез. Наблюдаются случаи терратогенеза растений девясила и гравилата под ЛЭП-500 (Гуреева, Карташев, 1982). Отмечаются эллипсоидные движения у тычинок ряда цветков, растущих под проводами. ЭП ЛЭП влияет на характер движения летающих насекомых, которые, попадая в зону 30–50 см от проводов, резко меняют направление полета, а залетая под провода, сразу же теряют способность к полету и падают вниз. Наиболее вероятной причиной всех отмеченных феноменов является

механоэлектрический эффект. Выявлены изменения в поведении пчелиной семьи. Рабочие особи в ульях под ЛЭП возбуждены, возрастает звуковой фон гнезда, повышается на 1–2 градуса температура воздуха в улье, что приводит к повышению в 3–6 раз концентрации CO_2 . Растет агрессивность пчел, и падает медосбор. При строительстве сот активизируются прополисование улья и частота роения, происходит снижение веса фуражиров и увеличивается их смертность. Вынос ульев за пределы ЛЭП и экранирование их заземленной металлической сеткой ослабляют негативное влияние, что является существенным доказательством отрицательного влияния переменного электрического поля на семейную жизнь пчел (Еськов, Брагин, 1986). По мнению В.М. Орлова (1990), чувствительность к электрическому полю представителей конкретного вида насекомых можно предсказать на основании анализа его внешней морфологии. Рассмотрим уравнение резонансной частоты консоли, выполненной в виде полый трубки, описывающее колебательные движения выростов тела насекомых:

$$f_p \approx \frac{1}{2l^2} \sqrt{\frac{YR \Delta}{\rho}} .$$

Значения резонансной частоты f_p у представителей разных видов насекомых, входящих в уравнение величин: длина вибрирующей структуры l – от 0,1 до 50 мм, ее радиус R – от 1 до 100 мкм, удельная плотность ρ – от 1 до $2 \cdot 10^3$ кг/м³, модуль Юнга Y – от $1 \cdot 10^7$ до $1 \cdot 10^8$ Па. Расчетные значения f_p укладываются в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц. Следовательно, для подавляющего большинства насекомых, воспринимающих электрические поля через электромеханические эффекты, наибольшую реакцию следует ожидать при использовании полей низкочастотного диапазона.

Прогнозируя величину ответных реакций на воздействие поля, необходимо принимать во внимание среду обитания животного. Жуки жужелицы, являющиеся обитателями подстилки и верхнего почвенного горизонта, в своей повседневной жизни постоянно сталкиваются с многочисленными препятствиями, встречающимися на пути. Поэтому

ожидать у них серьезного изменения поведения при появлении колебательных движений антенн, вызванных электрическим полем, нет оснований.

Насекомое в полете, для которого исходящая от ветрочувствительных механорецепторов информация играет первостепенное значение для поддержания стабильного положения тела и тем более для выполнения виражей. Сигналы об углах изгиба встречными потоками воздуха правой и левой антенн, ветрочувствительных сенсилл, а также данные от крыловых мышц позволяют делать поправку на ветер, избегать ненужных поворотов и кренов. Поэтому даже незначительное искажение сигнала, вызванное колебанием рецепторных органов в поле, приводит к нарушению реальной картины окружающей обстановки, что сказывается на поведении насекомых, стремящихся либо покинуть поскорее опасную зону, либо совершить посадку. В таких условиях нарушается пищевое, репродуктивное поведение и реализуются поведенческие стереотипы, связанные с самосохранением. Летающие насекомые должны обладать в целом большей чувствительностью к электрическим полям по сравнению с нелетающими обитателями травяного яруса и почвенных горизонтов. Следует делать поправку на морфологию покровов представителей конкретного вида и значимость для них тактильной рецепции.

Значимость вибрирующего под влиянием поля органа в системе механорецепторов насекомого влияет не только на величину ответной реакции, но и на саму вероятность ее проявления. Проиллюстрируем это положение на примере тараканов и комаров. И те и другие отличаются в целом высокой чувствительностью к электрическому полю, а реакция избегания поля лучше выражена у комаров. Причина различий заключается в специализации механорецепторов у насекомых. Антенны, которыми воспринимают ЭП пчелы, тараканы, комары как специализированный механорецепторный орган участвуют в анализе среды при выборе направления движения. Антенны отличаются не только разной

чувствительностью к деформациям, но и способностью различать воздействия по силе. Джонстонов орган, воспринимающий отклонение антенны у комаров в низкочастотном диапазоне, обладает чувствительностью порядка 5–10 Дб. Поэтому представители данной группы способны к восприятию градиентов ЭП и их вектора и избегают пространства с высокими напряженностями поля. У крыльев, которыми воспринимают поля дрозофилы, функция рецепции, видимо, выражена слабее. Мушки оказались неспособными определять вектор нарастания напряженности с градиентом порядка 200 В/см^2 и без видимых задержек в пространстве с полем замедляют двигательную активность. Следовательно, отпугивание электрическими полями более вероятно для насекомых, воспринимающих их специализированными механорецепторными органами :антеннами или специальными механорецепторными сенсиллами по сравнению с представителями, у которых рецепция осуществляется образованиями, не участвующими в механорецепции.

Если считать, что основной способ реагирования – изменение поведения, становится понятной повышенная чувствительность к ЭП личинок по сравнению с яйцом и куколкой (Орлов и др., 1985; Bindokas et al., 1981). Более того, открыто живущие личинки должны быть более чувствительными по сравнению со скрытоживущими, а имеющие волосяной покров – по сравнению с лишенными его.

Электромеханические эффекты на покровах возникают в электрических полях и у позвоночных животных. Они описаны у голубей (Graves, 1977), морских свинок (Kaune et al., 1980) и других грызунов (Бриджес, Прич, 1981). Некоторые авторы (Бонелл и др., 1988) полагают, что такой способ восприятия низкочастотных электрических полей характерен для многих позвоночных, в том числе и человека. Электромеханические эффекты имеют место в ЭП и у растений, угнетая их рост и развитие, нарушая естественную ориентацию стебля (Кирпотин, Орлов, 1987), то становится очевидным, что кулоновские силы и вызванные ими деформации выступающих частей тела

занимают заметное место в ряду механизмов, вызывающих ответные реакции живых организмов при воздействии на них статических и низкочастотных электрических полей.

ХРОНИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ПЕРЕМЕННОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПОСТНАТАЛЬНОМ РАЗВИТИИ ЖИВОТНЫХ

Исследования проводились на самцах беспородных белых мышей, которые помещались в специально сконструированную установку с переменными электрическими полями (ПеЭП) в возрасте 15 дней и подвергались постоянному влиянию поля (40 кВ/м, 50 Гц) в течение 440 суток. Контрольная группа животных находилась в аналогичных условиях без действия поля. Взятие гистоморфологического материала для анализа физиологического состояния системы крови, сперматогенеза, надпочечников и щитовидной железы осуществлялось на 20, 25, 30, 35, 55, 95, 175, 335 и 455-е сутки календарного возраста животных.

Хроническое влияние переменного электрического поля на систему крови белых мышей

Система крови животных относится к наиболее лабильным физиологическим системам и чувствительна к внешним воздействиям. После статистической обработки результатов экспериментальных исследований статистически достоверные изменения в показателях системы крови представлены на рис. 15 и 16.

Анализ данных, представленных на рис. 15, позволяет заметить, что наиболее чувствительным возрастным периодом к действию ПеЭП является критическая стадия ювенильного периода – 25-е сутки календарного возраста белых мышей. При действии электрического поля происходит снижение эритроцитов и лейкоцитов на фоне повышенного количества ретикулоцитов. В переходный период половозрелости (55-е сут) отмечается менее выраженное снижение количества лейкоцитов. Для среднего возраста характерно повышение количества эритроцитов при хроническом действии ПеЭП с последующей нормализацией. В критический период (335-е сут) развития инволюционных изменений отмечается снижение численности ретикулоцитов. Следовательно, при хроническом действии поля в постнатальном развитии животных наблюдаются волнообразные адаптивные реакции показателей периферического отдела системы крови, наиболее выраженные в ювенильном и критических периодах постнатального онтогенеза белых мышей.

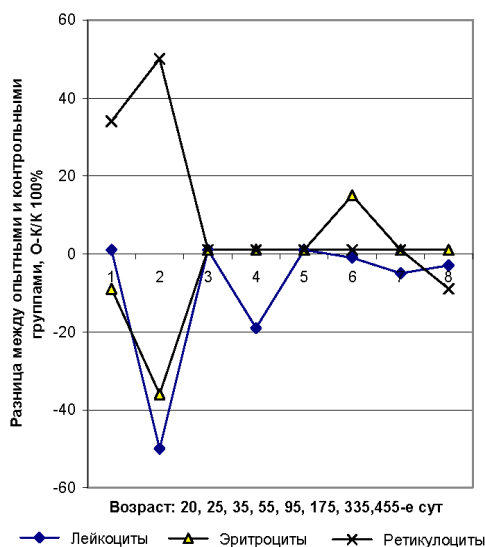


Рис. 15. Хроническое влияние ПеЭП на элементы периферической крови животных

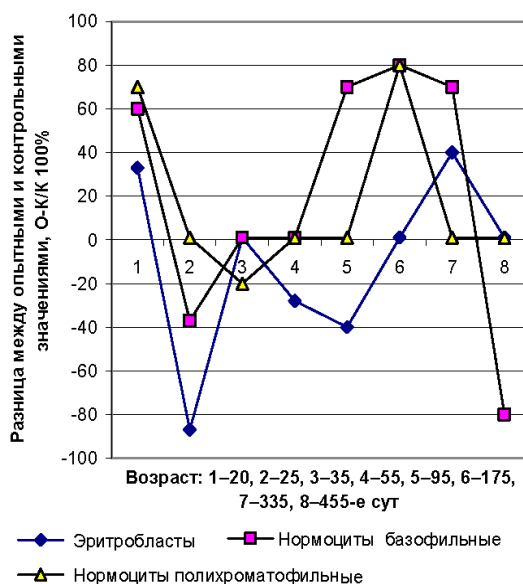


Рис. 16. Хроническое действие ПеЭП на клеточные элементы эритрона

Анализ данных, представленных на рис. 16, позволяет считать, что переменное электрическое поле приводит к повышению пролиферирующихся клеток-эритробластов и дифференцирующихся нормоцитов в течение первых пяти дней. Последующее хроническое действие поля в 25-е возрастные сутки приводит к уменьшению числа эритробластов и нормоцитов. Для эритробластов характерен невысокий уровень в 55-е и 95-е сутки, который компенсируется активацией процессов дифференцировки нормоцитами в 95–335-е сутки. В 454-е сутки наблюдается торможение дифференцировки на стадии базофильных нормоцитов и снижение количества ретикулоцитов в периферической крови опытной группы животных. Необходимо отметить, что в ювенильном возрасте при действии электрического поля изменения в системе крови носят однонаправленный характер. Развитие возрастной адаптации к хроническому

влиянию поля при пониженной пролиферативной активности заключается в интенсификации процессов дифференцировки костно-мозговых клеток эритроидного ростка животных.

Последующий анализ возрастной устойчивости системы крови белых мышей позволил выделить наиболее чувствительный к электрическому полю критический период ювенильного возраста: 20–25-е сутки, в котором происходит после активации значительное снижение уровня пролиферирующих и дифференцирующихся клеток: эритробластов и нормоцитов. Хроническое действие ПеЭП приводит к повышению уровня нормоцитов в среднем возрасте. Начиная с 335-х суток календарного возраста животных, в опытной группе животных снижается скорость дифференцировки нормоцитов, что приводит и к уменьшению числа ретикулоцитов в крови животных.

Следовательно, длительное хроническое влияние ПеЭП приводит к волнообразным адаптивным изменениям пролиферирующих и дифференцирующихся процессов эритроидного пула клеток, приводящим к отклонениям в периферических элементах системы крови белых мышей. Наиболее выраженные изменения при действии поля наблюдаются в критические периоды постнатального развития системы крови мышей.

Влияние переменного электрического поля на сперматогенез животных

Среднестатистические нормированные изменения показателей при хроническом действии ПеЭП в системе сперматогенеза мышей представлены на рис. 17 и 18. Анализ данных, представленных на рис. 17, позволяет считать, что снижение количества стволовых клеток сперматогенного эпителия – сперматогоний А-типа и дифференцирующихся клеток-сперматоцитов происходит в первые пять суток после действия поля и продолжается в течение всего наблюдаемого периода. Для постнатальной динамики сперматид–предшественников сперматозоидов характерно повышение в первые 5 суток последствия ПеЭП, снижение в 55-е возрастные сутки с последующим увеличением численности к 455-суточному возрасту животных.

Сперматогонии Б-типа в отличие от стволовых клеток активно вступают в митоз, продуцируя сперматоциты, которые вступают в стадию мейоза с разделением количества хромосом и появлением гаплоидных половых клеток-сперматид. Дифференцируясь, сперматиды превращаются в сперматозоиды. Увеличение численности сперматогоний Б-типа после первых пяти суток влияния поля можно рассматривать в качестве компенсаторной реакции снижения эффективности сперматогенеза подопытных животных. Следовательно, наиболее поражаемой при действии ПеЭП стадией сперматогенеза мышей можно считать пролиферирующие стволовые клетки сперматогоний А-типа, мейоз сперматоцитов, нарушения в которых приводят к снижению общего количества сперматозоидов (рис. 18).

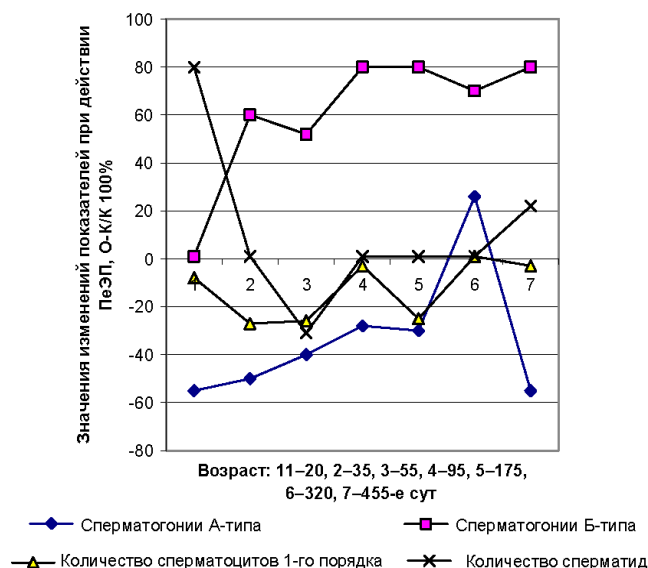


Рис. 17. Влияние ПЕЭП на сперматогенез мышей

В качестве компенсаторного механизма возрастной адаптации системы сперматогенеза можно рассматривать повышение количества сперматогоний Б-типа, уровень которых в контрольной группе животных ниже сперматогоний А-типа и число сперматид. Сравнительный анализ изменений в системе крови и сперматогенеза при хроническом действии электрического поля приводит к заключению об аналогичных процессах развития возрастной адаптации в исследуемых физиологических системах организма животных. Наиболее поражаемыми являются активно делящиеся клетки, снижение их численности ускоряет стадии дифференцировки, что приводит к частичной или полной компенсации необходимого количества сформировавшихся зрелых клеток. Необходимо отметить, что аналогичные процессы наблюдаются и при действии ионизирующего излучения на человека и животных (Мязин и др., 2009).

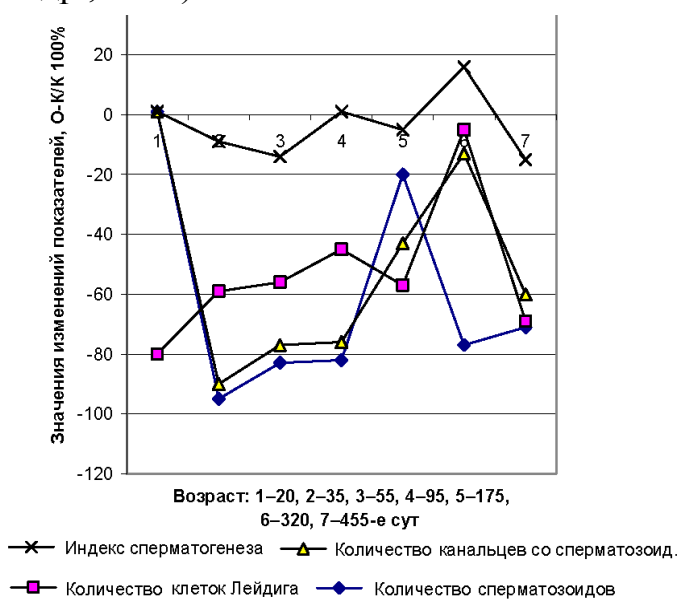


Рис. 18. Хроническое влияние ПЭП на морфологические показатели семенников белых мышей

Сравнительный анализ морфологических показателей семенников самцов белых мышей, представленных на рис. 18, выявил значительное снижение количества сперматозоидов и семенных канальцев со сперматозоидами после десяти суток действия поля в ювенильный и последующие периоды жизни животных. В семенных канальцах наблюдалось замедление процессов формирования просветов, увеличение числа сперматид. В эндокринных клетках Лейдига отмечалось торможение их дифференцировки. Снижение количества клеток Лейдига, вырабатывающих тестостерон, происходит после пятисуточного действия электрического поля и остаётся на низком уровне в течение всего постнатального развития, что приводит к понижению сексуальной активности и более ранней возрастной импотенции животных. С увеличением времени экспозиции ПЭП до 40 суток на этапе половозрелости мышей несколько стимулируются эндокринные процессы, но снижается индекс сперматогенеза. В семенниках увеличивается число канальцев со слущенным эпителием, в цитоплазме клеток Сертоли отмечалась вакуализация. Последующее увеличение экспозиции поля в 95–455-е сутки вызывает усиление негативных морфологических изменений. Оболочки семенных канальцев пропитываются отёчной жидкостью, растёт число опустошенных семенных канальцев, снижается количество сперматозоидов и эндокриоцитов.

Необходимо отметить, что кратковременное влияние электрического поля не приводит к значительным нарушениям в системе сперматогенеза мышей (табл. 7).

Таблица 7

Изменения между опытными и контрольными среднестатистическими показателями системы сперматогенеза при кратковременном (10 сут) действии ПЭП (40 кВ/м, 50 Гц) на разновозрастных самцов белых мышей

Показатели системы сперматогенеза	Молодые животные (О–К)	Половозрелые (О–К)	Старые животные (О–К)
Сперматогонии А-типа	-11±1	2±1	-1,7±0,4
Сперматогонии Б-типа	6±2	1±2	7±1
Сперматоциты 1-го порядка	-13±4	1±3	-40±7
Сперматиды	8±3	2±5	-30±5
Сперматозоиды	-5±2	2±3	-15±6
Семенные	-5±2	-6±2	-45±6

канальцы со сперматозоидами			
Количество клеток Лейдига	-19±5	-7±3	-39±6

Примечание: $X \pm mt$ – среднестатистическая разница с 95% уровнем значимости между опытными и контрольными значениями показателей.

Наиболее чувствительными к влиянию поля являются молодые и старые животные, в то время как нарушения в половозрелом возрасте носят обратимый характер. При кратковременном действии ПеЭП направленность изменений в семенниках мышей аналогична при хроническом влиянии, но они менее выражены и не носят системный характер. Таким образом, полученные экспериментальные результаты состояния семенников животных свидетельствуют о необратимых хронических изменениях сперматогенеза, приводящих к более раневозрастному снижению сексуальной активности и стерильности в условиях длительного влияния переменного электрического поля.

Хроническое влияние переменного электрического поля на состояние надпочечников мышей

Надпочечные железы, ответственные за развитие общего адаптационного синдрома в организме, реагируют на внешние воздействия и обеспечивают гомеостаз развивающегося организма. Противоречивость литературных данных по влиянию электрических полей на физиологическое состояние желёз (Сиюй Оуян и др., 2005; Анисимов и др., 2003) стимулировало проведение исследований по выяснению биологической эффективности хронического действия ПеЭП (40 В/м, 50 Гц). Среднестатистические нормированные изменения показателей надпочечных желёз при хроническом действии электрического поля, начиная с пятнадцатисуточного возраста животных, для удобства последующего анализа разделены на три функциональные группы и представлены на рис. 19–21. Результаты экспериментальных исследований изменений морфометрических показателей надпочечников представлены на рис. 19.

Анализ данных позволяет заметить, что хроническое действие поля приводит к развитию волнообразного типа возрастных адаптивных реакций в онтогенезе белых мышей. В ювенильном периоде под влиянием ПеЭП происходит увеличение размеров: коры, клубочковой и сетчатой зон надпочечных желёз, что свидетельствует о развитии стресс-реакции. Уменьшение гипертрофии железы в среднем возрасте можно рассматривать в качестве адаптивного процесса к внешнему фактору. Повторное повышение исследуемых показателей в начальной инволюционной стадии свидетельствует о незаконченности адаптаций к электрическому полю и о вероятности развития патологических изменений в организме животных, что

подтверждается и повышенной смертностью (10–20%) мышей в опытной группе. Отмечались также гемодинамические изменения: расширение венозных синусов, интерстициальные отёки и увеличение количества деструктивных ядер в корковом слое надпочечников в 355–455-е сутки календарного возраста животных.

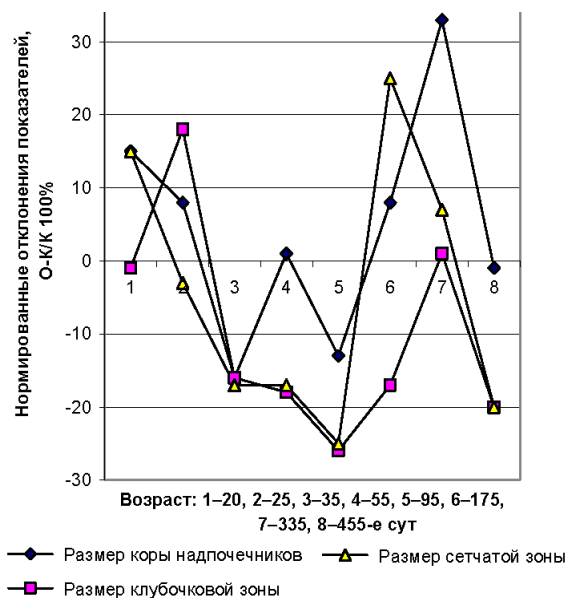


Рис. 19. Влияние ПЭП на морфометрические показатели надпочечников

Изменения показателей функционального состояния надпочечных желёз при хроническом действии ПЭП представлены на рис. 20.

Для показателей функционального состояния надпочечных желёз при действии поля в постнатальном развитии мышей характерен волнообразный тип адаптивных реакций. Размеры ядер желёз пропорциональны уровню секреторной активности при синтезе гормонов. В клубочковой зоне вырабатываются минералкортикоиды, регулирующие водно-солевой обмен организма; в сетчатой и пучковой зонах синтезируются глюкокортикоиды и половые гормоны. При действии электрического поля на ювенильных животных в течение первых десяти суток повышается секреторная активность пучкового, клубочкового и сетчатого слоёв, которую можно рассматривать в качестве стрессорной. В среднем возрасте наблюдается активация секреторной деятельности клубочковой и пучковой зоны. В 95-суточном возрасте повышается активность сетчатой зоны. В инволюционном периоде: 335–455-е сутки при хроническом действии ПЭП наблюдается повышение исследуемых показателей с последующим снижением. Следовательно, длительное влияние электрического поля промышленной частоты вызывает нарушения в обмене веществ, в водно-солевом балансе, приводит к напряжению систем адаптации и хроническому стрессу в постнатальном развитии, который наиболее выражен в критические периоды онтогенеза животных.

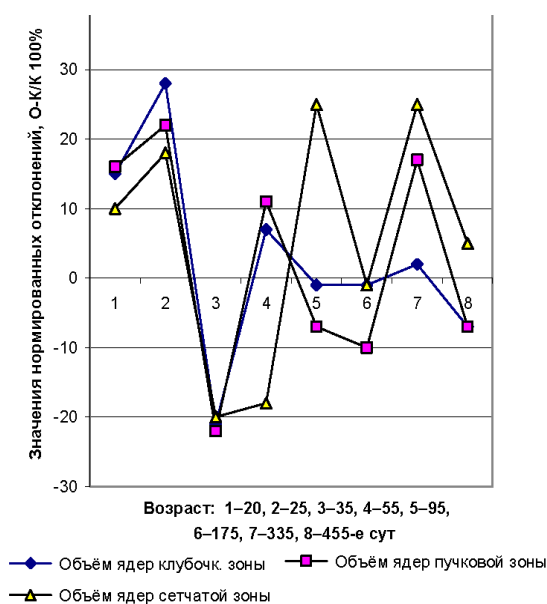


Рис. 20. Хроническое влияние ПеЭП на функциональное состояние надпочечников мышей

В качестве подтверждения развиваемой нами концепции об активации адаптивных процессов рассмотрим экспериментальные данные по хроническому влиянию поля на содержание витамина С в надпочечниках (рис. 21). В надпочечниках содержится постоянно относительно высокая концентрация витамина С, который используется ими для выработки стероидных гормонов и катехоламинов. При развитии стресса, активации синтеза стероидных гормонов наблюдается снижение содержания витамина С в надпочечниках, что является показателем уровня развития стресс-реакции организма.

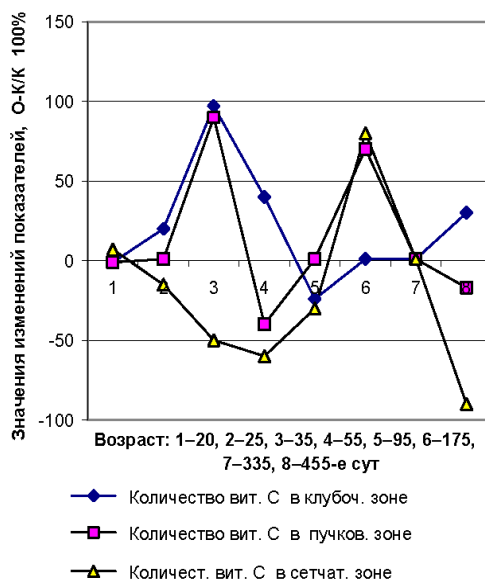


Рис. 21. Содержание витамина С в надпочечниках при действии ПеЭП на животных

Анализ результатов исследований, представленных на рис. 21 позволяет заметить снижение уровня содержания витамин С при действии ПеЭП в 25, 55, 95 и 455-е сутки календарного возраста мышей. Для клубочковой и пучковой зон характерна синхронность изменений содержания витамина С, за исключением 455-х суток, под влиянием поля. Содержание витамина С в сетчатой зоне, вырабатывающей глюкокортикоиды и частично половые гормоны, остается пониженным в течение всего периода индивидуальной жизни животных за исключением 175–335-х суток. Следовательно, гормоны, вырабатываемые сетчатой зоной, в большей степени ответственны за развитие адаптивных реакций к хроническому действию ПеЭП в постнатальном онтогенезе мышей. Таким образом, хроническое, сопоставимое с продолжительностью жизни мышей действие переменного электрического поля промышленной частоты вызывает волнообразный тип адапционных возрастных реакций надпочечных желёз, наиболее выраженных в критические периоды ювенильного и старого возраста животных.

Влияние переменного электрического поля на щитовидную железу животных

В современной научной литературе практически отсутствуют данные по влиянию электрических полей на физиологическое состояние щитовидной железы животных и человека (Карташев, Иванова, 1988; Воронцова, 2004) в то время как сама железа принимает активное участие в процессах роста и развития организма. В проведённых исследованиях получены данные по хроническому влиянию переменных электрических полей на состояние щитовидной железы самцов белых мышей. Среднестатистические результаты гистоморфологических изменений показателей щитовидной железы белых мышей при действии поля представлены на рис. 22.

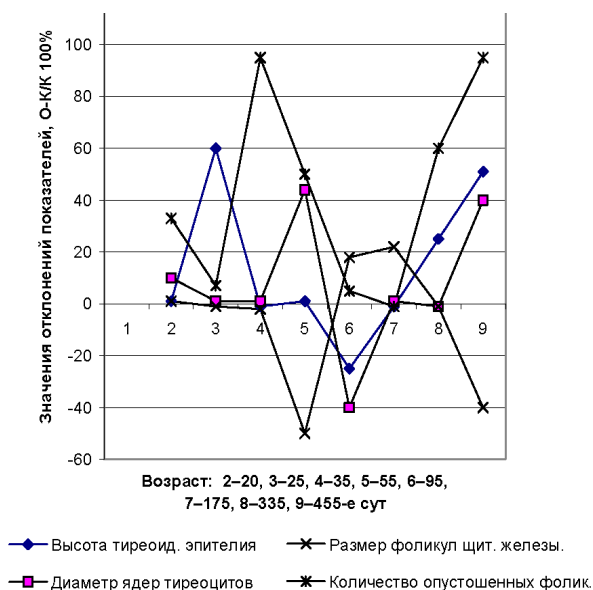


Рис. 22. Влияние ПеЭП на щитовидную железу

Анализ полученных данных выявил повышение функциональной активности щитовидной железы: увеличение диаметров ядер тиреоцитов, высоты тиреоидного эпителия и числа опустошенных фолликул в первые десять дней после действия электрического поля. В среднем возрасте наблюдается снижение исследуемых показателей с последующей активацией в период старения животных. Содержание опустошенных фолликул, которые отражают уровень секреторной активности, показывает значительный уровень напряжённости железы в ювенильном и старом возрасте при хроническом действии электрического поля. Сравнительный анализ развития возрастной адаптации при действии ПеЭП надпочечных и щитовидных желёз выявил синергическое взаимодействие эндокринных органов. Периоды активации двух желёз не синхронизированы в постнатальном онтогенезе.

В возрастные этапы, характеризующиеся относительно невысоким уровнем функционирования надпочечников, отмечается повышенная деятельность щитовидной железы. Вероятно, аналогичное компенсаторное взаимодействие эндокринных систем повышает надёжность возрастной адаптации к хронически действующим факторам. Следовательно, длительное влияние ПеЭП (40 кВ/м, 50 Гц) приводит к развитию волнообразного адаптивного процесса в динамике постнатального развития животных. Наиболее выраженные изменения наблюдаются в критические этапы развития ювенильного и инволюционного периодов жизни. В качестве шокового органа следует рассматривать систему сперматогенеза, в которой при действии поля происходят нарушения на стадии сперматогоний А-типа, сперматоцитов 1-го порядка и генерации клеток Лейдига, приводящие к снижению количества сперматозоидов и наступлению стерильности на более ранних возрастных этапах старения организма животных.

Проведённый статистический дисперсионный анализ позволил перейти к количественной оценке биотропности ПеЭП для каждой из исследуемых физиологических систем развивающегося организма мышей. Если суммарный биоэффект влияния поля соответствует 100%, то для системы сперматогенеза он будет соответствовать 35% при изменении действия поля 78% от всех исследуемых показателей. Для надпочечных желёз – 30% при реагировании 70%, для щитовидной железы – 20% при изменении 50% показателей и для систем крови – 10% при реагировании на ПеЭП 26% показателей крови. Следовательно, при хроническом влиянии электрического поля изменяются все исследованные физиологические системы организма. В то же время биотропность поля существенно зависит от специфичности каждой из них и возрастного состояния организма животных.

Система крови, обладающая центральными и автономными гомеостазирующими механизмами, реагирует в ювенильном возрасте, в процессе перестройки физиологических систем. В последующем возрастном периоде происходит адаптация её к хроническому действию поля. В период старения при снижении уровня резистентности наблюдаются и отклонения в

показателях крови. В целом изменения в системе крови мышей носят адаптивный характер и находятся в пределах физиологической нормы. Выполняющие функции адаптации надпочечные железы активно реагируют на ПеЭП в течение всего постнатального развития животных. Участвующая в возрастной адаптации щитовидная железа изменяется в среднем и старом возрасте. Функция семенных желёз заключается в большей степени в сохранении численности популяции и вида и характеризуется относительно пониженной индивидуальной защищённостью, что приводит к наиболее существенным нарушениям в её функционировании при хроническом влиянии переменного электрического поля в постнатальном онтогенезе животных.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ВОДНЫЕ ЭКОСИСТЕМЫ

Электромагнитные поля в водной среде реализуются в виде токов с различными градиентами и частотой в зависимости от диэлектрической проницаемости воды. К токовому воздействию чувствительны все обитатели водной среды, поэтому экологическая оценка ЭМП антропогенного происхождения приобретает первостепенное значение. Рассмотрим уровни естественных полей в океане, где проходила эволюция современных видов организмов, и которые подразделяются на теллурические, индукционные токи, образуемые морскими волнениями, диффузионные токи, биоэлектрические, суспензионные (Протасов и др., 1982), конвекционные и атмосферические. Теллурическими токами называют электрические токи нестационарного режима, коррелирующие с вариациями геомагнитного поля и солнечной активностью. Средняя плотность токов в море $3 \cdot 10^{-6}$ А/м во время магнитных бурь увеличивается в 30, 200 раз. С глубиной плотность теллурических токов возрастает. Диапазон частот от сотых долей герц и ниже. Индукционные токи возникают при движении морской воды в магнитном поле Земли и создают электрические поля от единиц мВ/км до 100 мВ/км. Токи, возникающие в результате концентрационных эффектов за счет диффузионных процессов на границе сред с различными концентрациями солей, составляют 2–4 мВ на 100 м. Конвекционные

электродинамические токи генерируются при перемешивании ионизированных слоев морской воды с ГМП и создают напряженности порядка 10 мВ на десятки метров.

Биэлектрические токи, обусловленные скоплением на глубине до 200 м микроорганизмов сапрофитных бактерий, фитопланктона и создающие градиент напряженности 10–15 мВ в слое 10–30 м. Для электрических полей грозового происхождения – атмосфериков характерно расширение частотного диапазона от 1 Гц до десятков килогерц. Величина поля на глубине 50 см варьируется от 0,1 до 50 мкВ/см, а в 100 м от места разряда в пресной воде она составляет 10 В/м. Эволюция водных систем на протяжении миллионов лет происходила в относительно слабоэлектрической среде, возмущаемой грозовыми разрядами, соответственно электромагнитным условиям водной среды сформировались и пороги чувствительности рыб к электрическим полям, которые представлены в табл. 8.

Таблица 8

Пороги возбуждения у обитателей водной среды (Протасов, 1982)

№	Вид	Частота (Гц)	Напряженность в В/м, вызывающая возбуждение
1	Лещь	10	0.06
2	Налим	5	0.25
3	Плотва	5	0.17
4	Селедь	5	0.07
5	Ставрида	15	0.06
6	Судак	15	0.1
7	Форель	10	1.4
8	Хамса	-	1.6
9	Кета	-	2.5
10	Ерш	-	4.5

1	1	Чавыча	-	3.2
2	1	Щука	-	2.7

В отличие от естественных полей ЭМП создаваемые в результате деятельности человека, превышают природные на несколько порядков. Так, сильные токовые поля возникают при пересечении ЛЭП СВН, рек, при пересечении нефте- и газопроводов, где постоянное электрическое поле используется в качестве антикоррозионной защиты (45 В, 2–4 А), при пресноводном и морском электрорыболовстве ($56 \cdot 10^{-6}$ А/мм, 250–1000 В), в электрорыбозаградителях (20–40 В/см, 10 А), электроразведке (до 200 А, 20 В/м) и при радиолокации. Помимо этого, на водные системы дополнительно оказывают влияние все наземные, воздушные и космические источники электромагнитных полей. Так, при пересечении ЛЭП-500 в водной среде на поверхности напряженность электрического поля составляет порядка 150 В/м, а индукционное поле на расстоянии 50 м в реке со скоростью течения 1 м/с равно 40–100 мкВ/м, что сопоставимо с пороговыми значениями электрочувствительности рыб.

Необходимо отметить, что электрический ток – один из активнейших биологических факторов. Вероятно, не существует минимальной величины тока, которая не оказывала бы биологическое действие, увеличение силы тока приводит к летальному исходу. Так, согласно данным Д. Ридля (1955), гибель большинства водных беспозвоночных наблюдается при плотности тока от 80 до $450 \cdot 10^{-6}$ А/мм². Известно, что рыбы – обитатели среды, обладающей высокой электропроводностью. Являясь наиболее древним классом позвоночных животных, рыбы прошли длительный путь эволюции при развитии электрической ориентации в водной среде. Рыбы по степени электрочувствительностью, подразделяются на две группы: высокочувствительные к токовым полям виды, имеющие специальные

электрические рецепторы с чувствительностью от сотых долей микровольта до нескольких десятков микровольт на сантиметр. Относительно менее восприимчивые к токовым полям виды, не имеющие специальных электрорецепторов с чувствительностью от долей милливольт на сантиметр до нескольких десятков милливольт на сантиметр. У рыб, не имеющих электрических рецепторов, электрический ток воспринимается как неадекватный раздражитель. При этом ток действует непосредственно на нервно-мышечные структуры или поверхностные рецепторы, выполняющие неэлектрические функции. Неэлектрические рыбы (осетровые, сиговые, сомовые и др.) имеют ампуляроподобные рецепторы, обладающие высокой чувствительностью к внешним электрическим полям. Так, для постоянного тока, по данным В.Р. Протасова и др. (1982), эффект избегания у хрящевых рыб наблюдается при плотности тока $3 \cdot 10^{-3}$ А/см² и градиенте напряженности 0,015 мВ/см. Механизм восприятия рыбами без электрорецепторов внешних электрических полей, вероятно, связан и с работой рецепторов боковой линии. Необходимо также отметить, что речные рыбы способны генерировать собственные электрические поля, позволяющие им лучше ориентироваться в пространстве. Так, осетр способен генерировать свое собственное поле 90 мкВ/см на расстоянии 10 см, с уровнем разряда 135 мВ/см; стерлядь – 260 мкВ/см на расстоянии 10 см. Значение электрических полей, генерируемых рыбами, чрезвычайно велико. Так, они используются в качестве сигналов опознавания пищевых объектов и как групповые сигналы, позволяющие рыбам собираться вместе, сигналы агрессивно-оборонительные, сигналы межполовые для опознавания и брачных игр и при пространственной ориентации. Следует заметить, что постоянно действующие искусственные слабые электрические поля являются биологически активным фактором, оказывающим существенное влияние на ихтиофауну. При действии на рыб постоянного электрического поля можно выделить несколько типичных стадий. Реакция – ориентировочная. При дальнейшем увеличении электрического поля наступает оборонительная

реакция – рыба сильно возбуждается и пытается выйти из зоны действия поля. Последующее увеличение напряженности ЭП вызывает анодную реакцию – рыба безусловно рефлекторно движется головой в сторону анода. Дальнейшее повышение ЭП приводит к состоянию электрошока рыбы с последующей гибелью.

При пересечении газопроводами водных бассейнов возникает опасность развития коррозии и образования разрывов в протяженных магистралях. Коррозия развивается в результате химической реакции: $4\text{Fe} + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2(\text{Fe}_3\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O})$ → водная окись железа или ржавчина – хрупкое образование, разрушающее при механическом воздействии. В связи с тем, что электрическая коррозионная реакция – это направленное движение электронов, создается обратный электрический потенциал, препятствующий движению электронов, а значит и развитию коррозии. В качестве катода используется сам трубопровод. По нему от станции катодной защиты подается напряжение 6–8 В при силе тока, равной 2 А (справка «Томсктрансгаз»). При этом теоретически потенциал на газопроводе в районе перехода через Обь не должен превышать 1,7 В. Следовательно, напряженность электрического поля на расстоянии 1 м от газопровода будет равняться 1,7 В/м. В случае механического повреждения газопровода станция катодной защиты способна увеличивать напряжение до 36 В. При этом в водной среде на месте повреждения будет протекать ток, равный 2 А. По проекту газопровод укладывается на глубину не менее 0,7 м ниже уровня дна реки. Однако наши измерения эхолотом выявили, что такая закладка газопровода характерна только для прибрежной зоны. Сравнительный анализ значений напряженности электрического поля на газопроводе – 1,7 В/м – с приведенными в таблице значениями порога возбуждения и электротаксиса и электрошока (0,01–1,5 В/м) для речных рыб позволяет считать данное значение напряженностей эффективным. Следовательно, электрический потенциал газопровода, пересекающего реку Обь, является своеобразным барьером на расстоянии от 1 до 4 м, что отрицательно сказывается, как

показали натурные отловы, на нерестовом ходе стерляди. Если учесть, что осетр для пространственной ориентации генерирует электрическое поле 90 мВ/м, а стерлядь – 250 мВ/м, то естественно, что электрическое поле газопровода существенно нарушает эхолокационные способности данных видов рыб. Постоянное электрическое поле в 200 мВ активирует созревание икры рыб и лягушки, что способствует более раннему выметыванию икры, а значит и потере большей части потомства. В случае пробоя и активного антикоррозийного процессов значение потенциала на газопроводе может увеличиваться до 36–20 В при силе тока 2 А. Возможна гибель рыбы и значительное расширение электрического барьера, препятствующего естественной нерестовой миграции рыб. Учитывая, что газо- и нефтеразработки интенсивно ведутся в Сибири и количество газопроводов возрастает, возникает реальная экологическая угроза снижения численности ценных видов рыб: осетр, стерлядь, нельма, муксун в связи с увеличением количества электрических барьеров, пересекающих Обской бассейн.

В качестве объекта исследований была выбрана стерлядь, ведущая придонный образ жизни и, вследствие этого, в наибольшей степени реагирующая на создаваемые электрические поля. Для нее характерна нерестовая миграция вверх по течению реки, поэтому о степени влияния электрической защиты газопровода на рыб можно судить по различиям в их численности выше и ниже данного объекта. Отлов стерляди производился плавной донной сетью ячеей 40 мм на двух участках реки вблизи газопровода, сходных по конфигурации дна, скорости течения и глубинам (ниже его по течению и выше). На участке реки выше газопровода был отловлен 41 экз. стерляди, а ниже – 70 экз. Следовательно, на контрольном участке реки выше газопровода численность стерляди была меньшей, чем ниже в среднем на 39%. Различия свидетельствуют о наличии преграды на пути нерестовой миграции стерляди. Преградой является создаваемое на подводном участке газопровода электрическое поле. Очевидно, на подводном участке газопровода создаются поля с различной

напряженностью вследствие различной заглубленности под поверхностью ложа реки, в т.ч. и участки с негативной для рыб степенью воздействия. Последствия влияния электрического поля могут проявиться в виде нарушений миграционного и нерестового поведения, преждевременного вымета икры, стресса. Нарушения состояния рыб, естественного хода их миграций и нереста способны снизить воспроизводительную функцию рыб, приводят к снижению численности их потомства. На основе учета местоположения подводных пересечений магистральных газо- и нефтепроводов в пределах Томской области и сроков преодоления этих участков рыбами в процессе их подъемных миграций следует, что наибольшую опасность эти объекты представляют для осетра, подобно стерляди ведущего придонный образ жизни, но по сравнению с ней совершающего гораздо более протяженные миграции. В процессе подъема из Обской губы на нерестилища более 50% мигрирующих особей вынуждено преодолевать все эти преграды. Проведенные исследования указывают на серьезную необходимость проведения комплекса исследований по хроническому влиянию электрического тока и электромагнитных полей ЛЭП-СВН, пересекающих водные биоценозы, на поведение, миграцию и размножение промысловых и ценных пород рыб.

Отсутствие комплексных экологических исследований в этом направлении, ограничений при нарушении электромагнитной среды водоемов может привести к непредсказуемым экологическим последствиям, связанным с деградацией водных экосистем и снижением их продуктивности.

ЭЛЕКТРОРЕЦЕПЦИЯ

Как известно, именно изучение электрических явлений в живых тканях, начатое медиками А. Гальвани и А. Вольта в 1791 г., открыло для человечества физику электромагнитных явлений. Впервые исследуя разряды электрического ската, Фарадей в 1832 г. доказал, что живые ткани могут являться источником электрического тока. Специфический электрический канал в экологии рыб возник благодаря электропроводящим свойствам воды. Высокая электропроводность воды, дифференцированность диэлектрических свойств водных объектов и способность рыб генерировать биоэлектрические токовые поля явились предпосылкой появления у рыб высокой электрической чувствительности. Все животные благодаря асимметричной секреторной и мышечной деятельности генерируют низкочастотные электрические поля. Рыбы оказались единственными известными животными, способными воспринимать и анализировать малые электрические токовые поля. Все рыбы в зависимости от своих электрических свойств могут быть поделены на три группы: сильноэлектрические виды с морфологически четко выраженными электрическими органами, создающими вокруг тела рыб сильные электрические поля для нападения и обороны; слабоэлектрические виды рыб с морфологически выраженными специализированными электрогенераторными тканями, создающими вокруг рыб импульсные электрические поля, используемые с целью локализации и связи, неэлектрические рыбы, без специализированных электрогенераторных тканей.

Электрические органы рыб представляют собой специализированные электрогенераторные клеточки – электроциты, происходящие из мышечных, нервных и железистых клеток. Электрические клетки электрического угря представляют собой тонкие пластинки $10 \text{ мк} \times 10 \text{ мм}$, которые в электрических органах собраны в столбики, соединенные между собой. Электропластинки в столбике соединены последовательно, в то время как

сами столбики – параллельно. Разряд ската составляет 20–50 В и создает в морской воде ток в несколько ампер, мощность электрического органа достигает 1000 Вт. Наиболее мощные разряды обнаружены у электрического ската, до 6 кВт, которые он испускает залпами до 150 В в 1 с, при длительности каждого импульса 3–5 мс. Разряды слабоэлектрических рыб порядка 10 В в частотном диапазоне 300 Гц – 20 кГц создают неспециализированные нейромышечные структуры. Разряды неэлектрических рыб, впервые описанные представляют собой колебания сложной формы с длительностью от 5 до 280 мс (Протасов, 1982).

Видовая особенность строения и плавания разных рыб определяет и специфику генерируемых ими низкочастотных электрических полей. Так, осциллограммы низкочастотных разрядов рыб могут быть использованы в качестве электровидовых индикаторов. В стаях слабые электрические поля отдельных особей, суммируясь, образуют единое электрическое поле стаи. По мнению современных исследователей, суммарное электрическое поле стаи является одним из основных синхронизирующих факторов поведения особей в стае. Электрические органы рыб, сформировавшиеся в процессе эволюции, выполняют две основные функции: оглушают жертву и осуществляют электролокацию. Как правило, слабоэлектрические рыбы живут в мутной воде или активны в ночное время. Посылая серии импульсов и осуществляя электроразведку, они хорошо ориентируются и локализуют как хищника, так и свою жертву.

В качестве приемников информации у рыб развились специализированные органы чувств – электрорецепторы. В зависимости от развития электрочувствительности рыб их разделяют на две группы: обладающих электрорецепторами или нет. К первой группе относятся виды, способные генерировать электрические поля специализированными электрическими органами. Ко второй – все остальные виды, для которых характерна повышенная относительно других позвоночных электрическая чувствительность. Неэлектрические рыбы: сомовые, осетровые, акулы и

другие ампуляроподобные, каналные с рецепторами боковой линии, способны воспринимать поля порядка 1 мкВ/см, 0,3 мВ/см при плотности тока $\sim 0,05$ мкА/см². Угри и тихоокеанские лососи воспринимают электрические поля 0,06 мкВ/см при плотности тока $0,15 \cdot 10^{-2}$ мкА/см². По данным А.Т. Миронова, многие морские рыбы способны воспринимать теллурические токи ($E = 9 \cdot 10^{-5}$ В/м), которые используются ими при миграциях. В частотном диапазоне чувствительности рыб выделяются два диапазона 1–25 и 200–700 Гц.

Специализированные органы чувств, позволяющие воспринимать слабые электрические поля, известны только у рыб и впервые были открыты Н. Лиссманом в 1958 г. Электрические рецепторы, как правило, образуются из морфологически измененных рецепторов боковой линии – механорецепторов и подразделяются на два основных типа. Тонические рецепторы – ампулы Лоренцини, представляющие собой длинные, до нескольких сантиметров, каналы-трубки, заполненные желеобразным веществом, открывающиеся на поверхности порами. Внутри тела рыб каналы расширяются, образуя ампулы, внутри которых располагаются рецепторные клетки. Для них характерна спонтанная ритмическая импульсация, изменяющаяся при действии низкочастотного и постоянного тока ($\sim 0,1$ мкВ/см; 0,005 мкА). Ампулы Лоренцини характеризуются идеальными кабельными свойствами с большой емкостью $C \sim 0,4$ мкФ/см и постоянной времени $\sim 2,5$ с, поэтому восприятие низкочастотных полей происходит с меньшим затуханием, чем высокочастотных. Второй тип – фазные рецепторы, быстро адаптирующиеся, чувствительные к высокочастотным гармоникам, дающие на постоянный ток быстро затухающие ответы. Эти органы расположены в бугристых образованиях. Интегральная максимальная чувствительность для электрорецепторов рыб в низкочастотном диапазоне располагается в области 700 Гц и равна 0,2 мкВ/см. В высокочастотной части находится в области 2100 Гц и соответствует 0,3–0,5 мкА/см.

Следовательно, тонические рецепторы работают непрерывно, типа гальванометров, измеряющих величину тока. Фазные рецепторы включаются только в момент появления или исчезновения внешнего электрического поля определяют интенсивность его и полярность. Суммарно работа двух типов электрических рецепторов аналогична функционированию катодного осциллографа. Высокая чувствительность электрорецепторов рыб позволяет им воспринимать индуцированные токи при движении в геомагнитном поле, ориентироваться по ГМП, а также воспринимать солнечно-земные флуктуации поля. Анализируя экологическое значение электрорецепторов в жизни рыб, В.Р. Протасов предлагает классификацию экологической направленности биоэлектрических полей рыб: средства нападения и защиты; сигналы ориентации: локации, общения, целостности стаи, территориальной агрессивности, межполовые, опознавательные, групповые сигналы сбора, навигационные при миграционном поведении.

Следовательно, как магниточувствительность, так и электропроводность впервые возникли у организмов, обитающих в водной среде. Эволюция электрочувствительности, специализируясь в водной среде обитания, достигла своего максимального уровня в классе рыб, в то время как магниточувствительность, впервые возникнув на уровне бактерий путем создания биогенного магнетита, широко распространилась практически во всех группах животных. Характерной особенностью как магниточувствительности, так и электрочувствительности является использование в качестве информации о состоянии окружающей среды постоянных (статических) и низкочастотных (до 1000 Гц) электромагнитных полей (С и НЧ ЭМП). Эволюционный выбор низкочастотного диапазона ЭМП экологически целесообразен, так как именно в этом диапазоне наблюдается взаимосвязь геофизических и солнечно-земных показателей в планетарном масштабе. Вместе с тем ЭМП С и НЧ, проходя без существенного ослабления через биосистемы, способны восприниматься практически на всех уровнях организации живой материи, т.е. оказывать

корректирующее влияние на направленность эволюционного процесса биосферы. Характерно, что все электрические процессы в биосистемах также располагаются в низкочастотном диапазоне. По мнению ведущего специалиста в области низкочастотной электромагнитной биологии профессора Г.Ф. Плеханова, основные закономерности биологического влияния статических и низкочастотных полей заключаются в следующем:

Пороговая напряженность С и НЧ ЭМП, вызывающих измеримую реакцию различных биосистем, составляет доли В/м по электрической и доли А/м по магнитной составляющей. В интервале напряженностей С и НЧ ЭМП от долей В/м или А/м до десятков кВ/м или кА/м среднестатистическая величина ответных реакций остается неизменной и не превышает 20–30% от исходного уровня.

Длительность и локализация воздействия, градиент поля, его векторные характеристики, однородность являются также биотропными параметрами, влияние которых на результирующий эффект не превосходит тех 20–30%.

Ответные реакции биосистем на действие С и Н ЭМП существенно зависят от уровня их организации. На элементарном, субклеточно-молекулярном уровне преобладают реакции специфические, однозначно связанные с параметрами поля, выраженность которых заметно уменьшается с повышением уровня организации. На организменном уровне существенно преобладают реакции неспецифические, и выраженность их уменьшается при переходе к биосистемам более низких уровней организации. Соответственно этому биосистемы суборганизменных уровней организации (ткань, органы, система) обладают меньшей чувствительностью к действию С и НЧ ЭМП.

Наиболее существенно реакции биосистем на С и НЧ ЭМП зависят от их исходного состояния. Величина и выраженность ответных реакций существенно возрастают, если биосистема за счет эндогенных или экзогенных факторов приведена в состояние пониженной резистентности. При этом если за счет снижения резистентности изменение какого-либо показателя функционирования биосистемы выводит ее за грань нормы,

действие С и НЧ ЭМП может вызвать патологии различной степени вплоть до летального исхода.

Таким образом, вся совокупность существующих факторов, гипотез и представлений позволяет рассматривать ЭМП низкочастотного диапазона планеты Земля в качестве системного экологического фактора, оказывающего существенное влияние на отдельные таксономические группы и биосферу в целом.

Контрольные вопросы:

1. Каковы особенности влияния низкочастотных ЭП на биосистемы?
2. Экологическая роль естественных электрических полей?
3. Экологическое влияние ПчЭП ЛЭП на биосистемы?
4. Экологическое значение хронического влияния ЭМП на биосистемы?
5. Экологические особенности влияния ЭМП на рыб
6. Магнитоторецепция?
7. Что такое электрорецепция ?

Часть 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ЭКОЛОГИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

Глава III. ФИЗИЧЕСКИЙ И ЭКОЛОГО-БИОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭМИ С БИОСИСТЕМАМИ.

ХАРАКТЕРИСТИКА РАДИОЧАСТОТНОГО ЭМИ, КАК ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЗНАЧИМОГО ФАКТОРА.

К радиочастотному диапазону относят электромагнитного излучения в диапазоне частот от 3 кГц до 6000 ГГц (Электромагнитная безопасность человека, 1999). Излучения этого типа называют радиоволнами. Сюда входит ряд поддиапазонов, излучения в пределах которых широко используются в качестве радиосигналов для целей связи, радиолокации и радионавигации, а так же предназначенных для лечебного, технологического и бытового применения. Перечень и название поддиапазонов был принят в 1975 г. Международным консультативным комитетом по радио (МККР) и включает в себя следующее:

крайне низкие частоты (КНЧ)	3 – 30 Гц;
сверхнизкие частоты (СНЧ)	30 – 3000 Гц;
инфранизкие частоты (ИНЧ)	300 – 3000 Гц;
очень низкие частоты (ОНЧ)	3 – 30 кГц ;
низкие частоты (НЧ)	30 – 300 кГц;
средние частоты (СЧ)	300 – 3000 кГц;
высокие частоты (ВЧ)	3 – 30 МГц;
очень высокие частоты (ОВЧ)	30 – 300 МГц;
ультравысокие частоты (УВЧ)	300 – 3000 МГц;
сверхвысокие частоты (СВЧ)	3 – 30 ГГц;

крайне высокие частоты (КВЧ)	30 – 300 ГГц;
гипервысокие частоты (ГВЧ)	300 – 3000 ГГц.

Таким образом, к радиочастотному относятся поддиапазоны электромагнитного излучения начиная с ОНЧ до ГВЧ включительно. В зависимости от длины волны излучения их называют соответственно длинные, средние, промежуточные, короткие, метровые, дециметровые, сантиметровые, миллиметровые и переходные. В англоязычных странах принято излучения дециметрового, сантиметрового и миллиметрового диапазонов называть микроволнами, а на пространстве бывшего СССР эти излучения обобщённо называли СВЧ-излучения..

Электромагнитные колебания излучаются в пространство с помощью различных антенных устройств. По мере удаления от источника излучения свойства электромагнитного поля меняются. Принято различать ближнюю и дальнюю зоны излучения. Дальняя зона располагается на расстоянии L от источника излучения при соблюдении условия $L \gg D^2 / \lambda$, где D – апертура излучателя. Для ближней зоны справедливо выражение $L \ll D^2 / \lambda$. На практике дальней зоной считается область пространства на расстоянии L и далее, если выполняется соотношение $D^2 / L \cdot \lambda$ больше 3. В дальней зоне электромагнитные колебания существуют в виде сформировавшихся бегущих волн определённой моды и при этом напряжённость электрической и магнитной составляющих поля уменьшается обратно пропорционально расстоянию: $E(L) \sim 1/L$; $H(L) \sim 1/L$. В ближней зоне электромагнитная волна не сформирована, E и H изменяются не в фазе и быстро убывают с увеличением расстояния ($1/L^2$ и $1/L^3$ соответственно).

Основной способ организации радиосигналов – модуляция электромагнитного излучения. **Модуляция – это более медленное по сравнению с периодом колебания радиоизлучения изменение его амплитуды A , частоты f или фазы φ по определённому закону.** Существуют амплитудная, частотная, фазовая и импульсная модуляции. В последнее время наиболее широко используется импульсная модуляция,

причём, импульсно модулированное радиочастотное излучение обладает более выраженным биологическим действием, поэтому необходимо более подробно охарактеризовать этот тип модуляции.

Импульсная модуляция возникает тогда, когда модулирующий низкочастотный сигнал имеет вид отдельного прямоугольного импульса, вследствие чего возникает электромагнитный импульс. Другими словами, электромагнитный импульс – это электромагнитное излучение в течение короткого промежутка времени, соответствующего длительности модулирующего сигнала. Результирующий сигнал, радиоимпульс, представляет из себя цуг (последовательность) высокочастотных электромагнитных колебаний. Участки нарастания и спада импульса называются передними и задними фронтами, максимальное отклонение от нулевого уровня излучения – амплитуда импульса. Длительность импульса или ширина импульсного сигнала определяется на некотором уровне его амплитудного значения (чаще всего на 0,5 или 0,9 от максимального значения). Радиоимпульсы передаются с определённой частотой (постоянной или переменной), и возникающая импульсная последовательность характеризуется скважностью. **Скважность – это безразмерная величина, равная отношению периода повторения импульсов к длительности одиночного импульса.**

Радиоимпульсы широко используются в радиолокации и многоканальных системах связи (сотовой), где в качестве сигналов, переносчиков информации, используются периодические последовательности импульсов. Такая последовательность позволяет варьировать четырьмя параметрами: частотой повторения импульсов, амплитудой, шириной (длительностью) и фазой. Поэтому, соответственно, возможны четыре вида импульсной модуляции: амплитудно-импульсная, частотно-импульсная, широтно-импульсная и фазово-импульсная.

Энергия электромагнитного излучения, распространяясь в пространстве и встречаясь с объектом любой природы (органической или

неорганической), может отражаться, частично или полностью поглощаться объектом или проходить сквозь него. При исследовании биологического действия радиочастотных ЭМИ, как и в фотобиологических и радиобиологических исследованиях, придерживаются принципа Гроттгуса, в соответствии с которым **только та часть энергии излучения может вызывать изменения в веществе или объекте, которая им поглотилась; отражённая или прошедшая часть энергии воздействия не оказывает.** Следовательно, именно поглощённая объектом энергия ЭМИ будет определять наличие или отсутствие эффекта воздействия, его характер и величину.

Наиболее эффективно энергия ЭМИ поглощается биологическими тканями с высоким содержанием воды (тканевая жидкость, кровь, мозг) и в меньшей степени - в жировой и костной ткани (А.С. Пресман, 1968; Х.П. Шван, 1971; Б.И. Давыдов с соавт., 1984). Глубина её проникновения d определяется как расстояние вглубь объекта, на котором величина электрического поля убывает в $e=2,7$ раза. Считается, что в биологических тканях и средах напряженность падающего поля E уменьшается в $e = 2,7$ раз на расстоянии d от поверхности объекта, равном $0,1 - 0,01$ длины волны. Наблюдаемые при этом биологические эффекты являются результатом поглощения энергии ЭМИ атомами, молекулами, клетками, тканями, органами и всем организмом в целом, то есть любой определяемый отклик, возникновение которого приписывается влиянию ЭМИ, – следствие поглощения части энергии излучения или ее перераспределения. При этом длина волны излучения в УВЧ и СВЧ-диапазонах не будет определять величину эффекта и его характер, тогда как при воздействии КВЧ-излучения наблюдаемый эффект во многих случаях зависит от длины волны и носит резонансный характер. Во всех случаях энергии квантов радиочастотного ЭМИ не достаточно для разрыва химических связей или ионизации молекул. По этой причине рассматриваемые излучения относят к классу **неионизирующих**. Поглощение любым объектом энергии радиочастотного

ЭМИ сопровождается её преобразованием в тепловую. При достаточно высокой интенсивности воздействия возможно повышение температуры во всём объекте или части его. Указанный нагрев может быть физической причиной формирования биологического эффекта, и в подобных случаях говорят о **тепловом (термогенном)** действии ЭМИ. Однако, зачастую биологический эффект наблюдается при действии низкоинтенсивного ЭМИ (ППЭ менее мВт /см), когда нагрев объекта отсутствует. В подобных случаях имеет место **нетепловое (нетермогенное)** влияние.

Вопросы дозиметрии и поглощённой энергии неионизирующих ЭМИ весьма сложны и, в целом, значительно сложнее, чем, например, дозиметрии ионизирующего излучения, поскольку в общем случае не существует какой-либо простой однозначной связи между параметрами внешнего и внутреннего полей (В.М. Штемлер с соавт., 1978). Даже исчерпывающие характеристики параметров ЭМИ в месте нахождения объектов в ряде случаев совершенно недостаточны для адекватной характеристики условий облучения. Величина фактически действующего внутреннего поля, наводимого в биообъекте, сильно зависит от его размеров, формы, ориентации в пространстве, анатомического строения, электрических свойств тканей.

При количественной оценке радиочастотных ЭМИ, как и при оценке ионизирующей радиации в радиационной биологии, используются понятия (значения) экспозиционной (поверхностной) и поглощённой доз. Применительно к радиочастотному ЭМИ, энергия, переносимая от источника излучения через нормально (перпендикулярно направлению) расположенную единичную площадку в единицу времени в зоне сформировавшейся волны, будет представлять плотность потока энергии (ППЭ) или плотность потока мощности (ППМ) и отображать величину экспозиционной дозы. В то же время, часть энергии ЭМИ, поглощаемая единицей объёма или единицей массы объекта а единицу времени будет представлять удельную поглощённую дозу. Интенсивность радиочастотных излучений методически

правильнее оценивать не по величине экспозиционной дозы, оцениваемой по плотности потока энергии [мВт/см² или мкВт/см²], а, что более соответствует принципу Гроттгуса, по величине удельной поглощенной мощности - УПМ [Вт/кг или мВт/г] (С.И. Алексеев с соавт., 1982; К.М. Уилл с соавт., 1983; Б.И. Давыдов с соавт, 1984).

Вопрос о выборе наиболее адекватного и практически приемлемого параметра, количественно характеризующего интенсивность воздействующего ЭМИ, в своё время широко обсуждался в литературе. До 70-х годов интенсивность оценивалась по величине падающей (экспозиционной) мощности или плотности потока энергии. Позже появилась необходимость более корректного оценивания воздействия, соответствующего принципу Гроттгуса. Р. F. Wocker & R.R. Bowman (1976) рекомендовали использовать для этой цели квадрат напряженности внутреннего поля. Р.Н. Schwan (1970) предложил оценивать воздействие по плотности тока, наводимого в ткани. В настоящее время большинство исследователей, изучающих воздействия радиочастотных электромагнитных излучений на биологические системы, считают более удобным и правильным использовать удельную поглощённую мощность - УПМ (SAR - specific absorption rate в англоязычной литературе), определяемую по скорости нагрева объектов и рассчитываемую по общепринятому выражению:

$$УПМ = 4,2 \times c \frac{\Delta T}{t} ;$$

где c – удельная теплоёмкость ткани, t - время облучения, ΔT - величина повышения температуры за время облучения. Представленное выражение – это рабочая формула, полученная из соотношения

$$УПМ = \sigma \times |E^2| / \rho = c \times dT/dt;$$

где σ – проводимость биологической ткани, ρ – плотность биологической ткани, E – действующее (среднеквадратическое) значение напряжённости электрического поля в биологической ткани, c – удельная теплоёмкость ткани, dT/dt – скорость повышения температуры в ткани при облучении.

Есть технология оценки УПМ, основанная на оценке соотношения падающей и отражённой энергии ЭМИ (K.C. Yee et al., 1984; A.G. Pakhomov et al., 2000),

$$\text{УПМ} = [4\acute{\alpha} (P_I - P_R) / \rho A] \exp(-2\acute{\alpha} x);$$

где $\acute{\alpha}$ – коэффициент ослабления в измерительном тракте, P_I – величина падающей на объект энергии, P_R – величина отражённой энергии, ρ – удельная плотность ткани объекта, A – поперечное сечение облучающего поля, x – расстояние от источника облучения до объекта.

но она используется в зарубежной практике, прежде всего в США. В дозиметрической и экспериментальной практике в России этот способ определения УПМ используется редко.

К настоящему времени есть различия в оценке ЭМИ, применяющихся в России и западных странах применительно к задачам нормирования. Западные страны используют, в соответствии с рекомендациями NCRP величины УПМ, в России же до сих пор используется понятие «электромагнитная нагрузка» (Электромагнитные поля и население, 2003), т.е. суммарный поток энергии, падающий на единицу облучаемой поверхности (ППЭ), умноженный на время облучения. В рамках международного проекта Всемирной организации здравоохранения «Электромагнитные поля и здоровье человека» проводятся исследования по гармонизации национальных стандартов, концепций и подходов, которые должны сблизить или сделать общими нормативы безопасного действия ЭМИ.

Контрольные вопросы.

1. Какие электромагнитные излучения относятся к диапазону радиочастотных?
2. Излучения ближней и дальней зоны: сходство и различие?

3. Что такое модуляция электромагнитных излучений, какие виды модуляции используются.
4. Закон Гроттгуса применительно радиочастотным излучениям.
5. Что такое неионизирующие и ионизирующие электромагнитные излучения?.
6. Количественное оценивание интенсивности радиочастотных ЭМИ.

ЕСТЕСТВЕННЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Природные источники электромагнитных излучений (ЭМИ). Естественными источниками ЭМИ в биосфере являются радиоволны, генерируемые космическими источниками. Кроме того, излучения возникают в результате некоторых процессов, происходящих в атмосфере Земли (разряды молний), при возбуждении колебаний в ионосфере Земли. Все эти излучения характеризуются широким диапазоном частот, имеют случайный, нерегулярный характер возникновения с относительно низким уровнем интенсивности. По этим причинам суммарный эффект воздействия таких излучений на биосистемы считается незначительным.

Техногенные (антропогенные) источники ЭМИ. На территории России размещено значительное количество передающих радиочастотных центров (РЧЦ) НЧ-, СЧ- и ВЧ-диапазонов, среди которых более 100 принадлежит Министерству связи России. РЧЦ (радиопередающие центры) размещены в

специально отведённых зонах и могут занимать обширные территории (до 100 га). Зону возможного неблагоприятного действия ЭМИ, создаваемых РПЦ, можно условно разделить на две части. Первая часть зоны – собственно территория РПЦ, где расположены все службы, обеспечивающие работу передатчиков и антенно-фидерных систем. Доступ в эту часть зоны ограничен, она охраняется. Вторая часть зоны – прилегающие к РПЦ территории, доступ куда не ограничен и где могут размещаться различные постройки, в том числе и жилые. В этом случае появляется угроза облучения населения, присутствующего в этой части зоны.

Высокие уровни ЭМИ наблюдаются на территориях, а не редко и за пределами, РПЦ НЧ, СЧ, ВЧ. Уровни ЭМИ, воздействию которых может подвергаться обслуживающий персонал, особенно во время работы на антенных полях, могут быть достаточно высокими. Широко распространёнными источниками ЭМИ в населённых пунктах являются также радиотехнические передающие центры (РТПЦ), излучающие в окружающее пространство ультракороткие волны ОВЧ- и УВЧ-диапазонов. Наибольшие уровни облучения людей и окружающей среды наблюдаются в районе размещения РТПЦ с высотой антенной опоры не более 180 м. Наибольший вклад в суммарную интенсивность воздействия вносят «уголковые» трёх- и шестиэтажные антенны частотно-модулированного вещания в диапазоне ОВЧ.

Радиостанции ДВ (30 – 300 кГц). В этом диапазоне длина волны относительно большая (200 м для 150 кГц). На расстоянии одной длины волны или менее от антенны излучение может быть большим. Например. На расстоянии 30 м от антенны передатчика мощностью 500 кВт, работающего на частоте 145 кГц, электрическое поле выше 630 В/м, а магнитное – выше 1,2 А/м.

Радиостанции СВ (300 кГц – 3 МГц). Для радиостанций этого типа при мощности 50 кВт напряжённость электрического поля на расстоянии 200

м может достигать 10 В/м, на расстоянии 100 м – 25 В/м, на расстоянии 30 м – 275 В/м.

Радиостанции КВ (3 – 30 МГц). Передатчики радиостанций этого диапазона имеют обычно меньшую мощность и зачастую располагаются в городах, в том числе даже на крышах жилых домов на высоте 10 – 100 м. Передатчик мощностью 100 кВт на расстоянии 100 м может создавать напряжённость электрического поля 44 в/м и магнитного поля 0,12 А/м.

Телевизионные передатчики. Телевизионные передатчики располагаются в городах. Передающие антенны размещаются обычно на высоте более 110 м. С точки зрения оценки влияния на здоровье интерес представляют уровни поля на расстояниях от нескольких метров до нескольких км. Типичные значения напряжённости электрического поля могут достигать 15 В/м на расстоянии 1 км от передатчика мощностью 1 МВт. Проблема оценки уровня ЭМИ телевизионных передатчиков актуальна в связи с резким увеличением числа телевизионных каналов и передающих станций.

Сотовая связь. В последние годы в России, как и во всём мире, получает широкое распространение сотовая связь. Работа этой системы основана на принципе деления некоторой территории на зоны (так называемые «соты») радиусом 0,5 – 2 км (за пределами города до 40 км). В узлах сот расположены базовые станции (БС), обслуживающие базовые территории, находящиеся в зоне их действия. БС являются приёмо-передающими радиотехническими объектами, излучающими электромагнитную энергию в диапазоне 300 – 3000 МГц. Каждая БС дополнительно оснащена комплектом приёмо-передающего оборудования радиорелейной связи, работающего в диапазоне 3 – 30 ГГц, обеспечивающим интеграцию конкретной БС в сеть.

Мощность передатчиков БС обычно не превышает 5 – 10 Вт по несущей частоте. В сотовой связи для БС обычно используются два вида приёмо-передающих антенн:

- слабо направленные с круговой диаграммой направленности в горизонтальной плоскости;

- направленные (секторные) с углом раствора (шириной) основного лепестка в горизонтальной плоскости 60 или 120 градусов.

Антенны БС устанавливаются на высоте 15 – 100 м от поверхности земли на уже существующих постройках или на специально сооружённых мачтах. Благодаря относительно большой высоте расположения и характеристикам диаграмм направленности передающих антенн для БС не требуются санитарно-защитные зоны, поскольку интенсивность создаваемого излучения на «уровне земли» селитебной территории не превышает предельно допустимых значений. Гигиенически значимые уровни ЭМИ могут регистрироваться только в непосредственной близости, на расстоянии 3 - 5 м от передающих антенн БС и от антенн радиорелейной связи. Из-за многолучевого распространения ЭМИ (переотражения) существует вероятность попадания излучений в помещения и балконы верхних этажей близкорасположенных зданий, а так же в помещениях последних этажей зданий на расстоянии 200 – 300 м от БС.

Мобильная радиосвязь. Системы мобильной радиосвязи на несущей частоте 27 МГц имеют большое распространение во многих странах мира и России. Они представляют собою станцию и абонентские станции, установленные на автомобилях или предназначенные для использования в руках. Напряжённость электрического поля ручных радиостанций может достигать до 200 В/м на расстоянии 3 см от антенны. Напряжённость электрического поля базовой станции этой системы может достигать 900 В/м на расстоянии 5 см от антенны. С учётом требований мер безопасности подобные системы связи требуют использование средств защиты.

Системы спутниковой связи. Системы спутниковой связи состоят из приёмопередающей станции на Земле и спутника, находящего на орбите. Диаграмма направленности антенны станции имеет ярко выраженный узко-направленный основной луч – главный лепесток. ППЭ в главном лепестке

диаграммы направленности может достигать нескольких сот $\text{Вт}/\text{м}^2$ вблизи антенны, создавая за счёт этого значительные уровни излучения на большом расстоянии. Например, станция мощностью 225 кВт, работающая на частоте 2,38 ГГц, на расстоянии 100 км создаёт поле с ППЭ $2,8 \text{ В}/\text{м}^2$.

Системы радиорелейной связи. В системах радиорелейной связи так же используются излучения с узконаправленными диаграммами. Мощность излучения относительно невелика – до нескольких десятков Вт. Частоты, используемые в этом виде связи расположены в диапазоне 5 – 40 ГГц. ППЭ может достигать единиц $\text{Вт}/\text{м}^2$ в месте расположения антенны.

Радиолокационные станции. Многие радиолокационные станции оснащены антеннами зеркального типа и имеют узконаправленную диаграмму излучения в виде луча, направленного вдоль оптической оси. Радиолокационные станции работают в основном на частотах в диапазоне от 500 МГц до 15 ГГц, а некоторые системы могут работать на частотах до 100 ГГц. Генерируемый ими сигнал принципиально отличается от излучений других источников. Связано это с работой локаторов, в ходе чего антенна поворачивается. Из-за периодического перемещения антенны в пространстве получается пространственное прерывистое облучение. Кроме того, присутствует и временная прерывистость облучения, обусловленная циклической прерывистостью работы локатора в режиме излучения. Поэтому окружающая среда и всё живое, находящееся в зоне работы локаторов, подвергается воздействию ЭМИ в фракционированном (прерывистом) импульсном режиме. Время работы локаторов разных режимах может исчисляться от нескольких часов в сутки. Например, у метеорологических локаторов с временной прерывистостью 30 минут излучение – 30 минут пауза, суммарная наработка в сутки не превышает 12 часов, в то время как радиолокационные станции работают круглые сутки. Ширина диаграммы направленности излучения в горизонтальной плоскости составляет несколько градусов, длительность облучения за период обзора составляет десятки миллисекунд. Метеорологические радиолокаторы могут создавать на

удалении 1 км ППЭ до 100 Вт/м^2 за каждый цикл облучения. Радиолокационные станции аэропортов создают ППЭ до $0,5 \text{ Вт/м}^2$ на расстоянии 60 м. Морское радиолокационное оборудование, устанавливаемое на кораблях, обычно имеет мощность передатчиков на порядок меньшую, чем у аэродромных радаров. Поэтому корабельные радиолокаторы, работающие в режиме сканирования пространства, создают ППЭ на расстоянии нескольких метров от антенн не более 10 Вт/м^2 .

Гигиеническая оценка электромагнитной обстановки в районе аэропортов в настоящее время оценивается как превышающая существующие санитарно-гигиенические нормы. Более того, снижение уровней облучения до ПДУ в настоящее время практически не выполнимо из-за насыщенности оборудования, обеспечивающего безопасность полётов. Помимо этого, возрастание мощности радиолокаторов и использование остронаправленных антенн кругового обзора приводит к значительному увеличению интенсивности ЭМИ, особенно СВЧ-диапазона, и создаёт на облучаемой территории зона с очень высокими значениями ППЭ. Наиболее неблагоприятные условия отмечены в жилых районах ряда городов, в черте которых расположены аэропорты, например, в Иркутске, Сочи, Ростове-на-Дону и ряде др.

Технологическое оборудование. Источником ЭМИ является тем же различного рода технологическое оборудование используемое в производственных условиях. Оно отличается значительным разнообразием частот и режимов облучения на рабочих местах. Источниками воздействия ЭМИ на рабочих местах являются антенны во время регулировки, настройки комплексов радиолокационных станций в цехах заводов или на полигонах, генераторные блоки, излучатели, волноводно-кабельные переходы в условиях изучения характеристик работы, настройки, отладки и других технологических или научно-исследовательских процедур. Как правило, уровни облучения регламентированы в пределах ПДУ, но иногда случаются превышения.

Системы охранной сигнализации. В последнее время в России появился ещё один источник электромагнитного облучения – системы охранной сигнализации, которые плохо контролируются. Генераторы УВЧ- и СВЧ- диапазонов имеют выходную мощность до 50 Вт, антенны кругового обзора работают в непрерывном режиме генерации сигналов, причём они могут устанавливаться либо в пунктах контроля территории, либо прямо на балконах охраняемых домов. Поэтому ППЭ излучения может достигать сотен мВт/см² и оказывать неблагоприятное влияние на здоровье человека.

Контрольные вопросы.

1. Какие естественные источники ЭМИ РЧ известны?
2. Что является техногенными источниками ЭМИ ?
3. Охарактеризуйте источники излучения, создаваемые передающими радиостанциями.
4. Что представляют из себя источники излучения, создаваемые системами сотовой связи?
5. Какие излучения генерируются радиолокационными системами и в чём их особенность?
6. Какие источники ЭМИ ещё существуют?

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ.

Все современные индустриально развитые страны широко используют и внедряют во все сферы жизни и производства различные радиоэлектронные и радиотехнические системы, приборы и устройства, генерирующие или использующие электромагнитные поля и излучения. К естественному фону электромагнитного излучения в связи с широким внедрением технологического оборудования различного назначения добавился и техногенный фон, существенно превышающий естественный. Усреднённая мощность земного радиоизлучения техногенной природы, оцененная только для метрового диапазона, в котором работает часть телевизионных передатчиков, близка по величине к 1 Вт/Гц, что в сотни раз выше "радиояркости" Солнца. Аналогичная картина характерна и для других радиочастотных диапазонов.

ЭМИ стало одним из комплекса значимых факторов окружающей среды. По мнению И.Н. Акоева (1983, 1986), ЭМИ в отличие от других антропогенных факторов, загрязняющих среду, невозможно заменить на менее загрязняющий природу фактор, как, например, возможно заменить одно химическое соединение другим, более безвредным. Здесь невозможно и создание замкнутого производственного цикла без выброса загрязняющего фактора в окружающую среду. Это обусловлено главным используемым свойством радиочастотных излучений – способностью распространяться на значительные расстояния. Следовательно, невозможно исключить воздействие этого физического фактора на человека и все элементы биосферы.

Электромагнитное "загрязнение" биосферы оказалось одним из комплекса техногенных факторов, способных оказывать неблагоприятное влияние на человека и другие живые системы (А.С. Пресман, 1968; Сердюк, 1977; Ю.Г. Григорьев, 1999-2003). Всемирная организация здравоохранения ввела понятие «электромагнитное загрязнение среды» (International EMF Project, 1999), фиксируя тем самым установление на Земле новых экологических условий. Воздействию ЭМИ подвергаются естественные природные комплексы, жители населённых пунктов (от посёлков до мегаполисов), люди, профессионально связанные с источниками радиочастотного излучения. К настоящему времени разработаны и используются санитарные нормы и правила, разработанные для гигиенической регламентации безопасного пребывания людей в условиях электромагнитного воздействия, но нет регламентов воздействия на природные комплексы. По этой причине проведение экологических экспертиз различных проектов, связанных с наличием электромагнитного воздействия, проводится с использованием нормативов, разработанных только применительно к человеку, что может оказаться не совсем верным.

Для людей потенциально наиболее опасным считается воздействие радиочастотным ЭМИ дециметрового диапазона длин волн (А.С. Пресман, 1968; В.М. Штемлер с соавт., 1978; О.Р. Gandhi, 1980). В сравнении с другими частотными диапазонами длина волны дециметрового излучения сопоставима с размерами облучаемого тела, органов или тканей, и это способствует более эффективному поглощению энергии, формированию так называемых "горячих" пятен в отдельных участках организма, где может формироваться значительный биологический эффект. Основными источниками излучения радиочастотных диапазонов являются системы радиолокации и связи. В первую очередь это телевизионные и радиопередатчики, радиолокационные станции, а также системы сотовой, мобильной и спутниковой связи. Особое внимание в настоящее время привлекает к себе излучение сотовой радиосвязи, число пользователей

которой за последние годы во всем мире, в том числе и России, увеличивается с геометрической прогрессией (Ю.Г. Григорьев с соавт, 1999 - 2003).

Важной особенностью систем сотовой радиосвязи является эффективное использование выделяемого для их работы радиочастотного спектра (многократное использование одних и тех же частот), что делает возможным обеспечение телефонной связью большого числа абонентов. Рабочая полоса частот и вид модуляции зависит от типа систем сотовой связи. В России используются станции сотовой связи, относящиеся к наиболее распространённым стандартам: MNT-450, AMPS/D - AMPS(IS-136), GSM-900, DSM(GSM-1800), работающие в диапазоне 450-1800 МГц с различными видами модуляции – 11, 50 и 217 Гц (Ю.Г. Григорьев с соавт., 1999; 2000; 2003). Тенденция развития сотовой связи в России такова, что она в ближайшее время будет активно развиваться. Если в 1998 году в России сотовой связью было охвачено 300 тысяч абонентов, то в 2000 году эта цифра выросла до миллиона, в 2003 году – уже 2,5 миллиона (1,5 миллиона – жители Москвы), а к 2010 году предполагается, что количество абонентов составит порядка трех миллионов (Ю.Г. Григорьев с соавт., 2000). Аналогичная тенденция наблюдается во всём мире. С 1990 по 2001 год количество сотовых телефонов возросло с 11 миллионов до 400. Мобильная связь (преимущественно стандарта GSM) наиболее распространена в странах Европейского Сообщества – около 47% пользователей. Всё это будет и далее усиливать степень электромагнитного загрязнения и оказывать биологическое действие на все элементы биосферы. Мощность излучения базовых станций определяется загрузкой и зависит от времени суток. При использовании сотового телефона речь идет о весьма сложном влиянии ЭМИ на головной мозг: 1) прямое воздействие на центральные структуры мозга;

- 2) прямое воздействие на периферические рецепторы вестибулярного, слухового и зрительного анализаторов.

3) рефлексогенное влияние на головной мозг через кожные рецепторы лица и уха.

Каков будет результат подобного влияния - пока спрогнозировать в полной мере невозможно, поскольку уровень знаний относительно физиологических механизмов влияния и уровень общественно социального осознания возможной опасности представляется недостаточным. В основе разработки и принятия нормативных документов лежат результаты научных исследований и наблюдений рассмотрим общую картину биологического действия радиочастотных ЭМИ.

Эффекты биологического действия радиочастотного ЭМИ.

Радиочастотные электромагнитные излучения, используемые с различными целями, представляют значимый для биологических объектов техногенный фактор. Их воздействие при различных физических параметрах на различные биологические объекты может отличаться. Одни и те же излучения в зависимости от обстоятельств могут оказывать как неблагоприятное, так и полезное действие. Поэтому для безопасного использования ЭМИ в различных сферах человеческой деятельности, необходимо знать характер реагирования биологических систем на облучение, общие закономерности и механизмы действия этих излучений.

К настоящему времени усилиями многих учёных и руководимых ими коллективами исследователей (С.М. Майкелсон, 1980; Н.В. Тягин, 1971; Ю.А. Холодов, 1975; У.Р.Эйди, 1980; W.R. Adey et al, 1981; О.В.Крылов, 1987; Ю.Г. Григорьев с соавт., 1999 - 2003) накоплено большое количество данных о влиянии ЭМИ различных интенсивностей и частот на живые организмы. Известно, что отдельные органы и целые системы органов животных и человека реагируют на радиочастотное электромагнитное облучение поразному. Последствия такого воздействия могут проявляться как в виде функциональных расстройств, так и в форме структурных изменений в организме. Возможны три варианта реакций организма на электромагнитное воздействие:

А) в отдельных случаях реакции на электромагнитное воздействие могут приводить к заметным нарушениям физиологических функций, которые остаются в пределах нормальной (физиологической) компенсации и не всегда оказываются вредными;

Б) некоторые излучения способны повышать эффективность определенных физиологических процессов, что используется в терапевтических целях ;

В) целый ряд воздействий и реакций на них будет сопровождаться последствиями, потенциально или непосредственно опасными для организма.

Установлено, что при общем и локальном облучении организма ответная реакция может быть зарегистрирована на всех уровнях организации: молекулярном, мембранном, клеточном, системном и организменном.

В экологическом и медико-санитарном плане в первую очередь важны реакции организма в целом и его физиологических систем как индикаторов влияния. Поэтому следует в первую очередь обратить внимание на имеющиеся к настоящему времени данные именно в таком аспекте, выделить органы и системы, критичные, т.е. особо чувствительные к действию радиочастотным ЭМИ. Молекулярно-клеточные аспекты влияния целесообразно будет рассмотреть при анализе механизмов влияния.

Физиологические системы критичные по отношению к ЭМИ.

На основании имеющихся данных в настоящее время выделен ряд критических по отношению к радиочастотному излучению физиологических систем. Наиболее чувствительны к воздействию ЭМИ : нервная (особенно центральная нервная), сердечно-сосудистая, эндокринная, иммунная и репродуктивная системы организма. Поражаются и другие органы и ткани, в частности, хрусталик глаза, а так же чувствительным к воздействию оказывается весь организм на стадиях индивидуального развития, особенно в так называемые критические периоды развития.

Реакции центральной нервной системы. Нейрофизиологическое действие ЭМИ на организм во многом обусловлено двумя обстоятельствами: а) способностью излучения контактировать с периферическими, кожными рецепторами (лучше всего в мм-диапазоне длин волн) и поглощаться структурами мозга (особенно в метровом и дециметровом диапазоне длин волн); б) высокой чувствительностью к ЭМП нервной системы, прежде всего, центральной нервной системы (А.С. Пресман, 1967; Ю.А. Холодов, 1975). ЦНС является информационно-управляющим центром всего организма и влияние, оказываемые радиочастотными излучениями на мозг, прямо или косвенно проявляется в реакциях других физиологических систем или в нарушениях их функционирования

Исторически проблема высокой чувствительности нервной системы к радиочастотным излучениям была порождена запросами гигиенической практики, поскольку многие клинические синдромы и заболевания неврологического характера получили распространение у лиц, профессионально подвергавшихся микроволновому воздействию (И.Р. Петров, 1970; Н.В. Тягин, 1971; Б.М. Савин с соавт., 1978). В результате проведенных позже экспериментальных исследований выяснилось, что ЭМИ оказывают влияние на всех уровнях ЦНС. Влияние проявлялось в изменении условно- и безусловнорефлекторной деятельности, изменении основных частот (паттернов) ЭЭГ, изменении показателей функционирования отдельных нейронов. В целом ряде работ (Б.И. Давыдов с соавт., 1984; Б.М. Савин с соавт., 1978; Ю.А. Холодов, 1975) указывается, что радиочастотные ЭМИ достаточно высокой интенсивности (более 10 мВт/см²) изменяют поведенческие реакции и рефлекторные реакции исследуемых животных. Данные эффекты связывают с понижением лабильности функционирования головного мозга вследствие общего перегрева организма, поскольку общая картина изменения поведенческих и рефлекторных реакций аналогична картине, наблюдаемой при тепловом стрессе.

Низкоинтенсивные ЭМИ (ППЭ единицы мВт/см² и менее) оказывают влияние на поведение животных и рефлекторные реакции организма (Ю.А. Холодов, 1975; W.R. Adey, 1971). Уильям Эйди (W.R. Adey), профессор из Института мозга Калифорнийского университета, одним из первых в начале 70-х годов 20 века показал, что при низкоинтенсивных воздействиях на организм более эффективное влияние оказывают модулированные излучения по сравнению с немодулированными. При этом важную роль играет частота модуляции излучения. К началу 80-х годов Эйди закончил большой цикл исследований, в котором доказал наличие зависимости нейрофизиологических эффектов от интенсивности воздействия и частоты модуляции. Эти зависимости получили среди исследователей название «частотные и энергетические окна» Эйди.

. Наиболее характерной, часто обнаруживаемой электроэнцефалографической реакцией -ЭЭГ-реакцией на воздействие радиочастотных ЭМИ является появление в записях электрической активности высокоамплитудных (порядка 500 мкВ) медленных (1 – 2 / сек), относящихся к диапазону δ -волн, или увеличение их числа. Характерным появлением или увеличением числа так называемых «веретённых» колебаний, относимых к σ -диапазону ЭЭГ. Оба типа электрической активности определённым образом указывали на развитие тормозных процессов в мозге.

Ю.А. Холодов в своей известной книге «Реакции нервной системы на электромагнитные поля» (1975) попытался систематизировать ЭЭГ- реакции на электромагнитные воздействия. Как оказалось, эффект воздействия может представлять последовательность четырёх реакций:

- реакция десинхронизации электрической активности мозга в момент начала воздействия;
- основная реакция (все изменения электрической активности мозга, возникающие во время облучения);
- реакция десинхронизации в момент прекращения воздействия;
- реакция последствия.

Подобная картина реагирования ЦНС наблюдалась не только в условиях воздействия радиочастотным ЭМИ, но и при воздействиях низкочастотных и постоянных электрических и магнитных полей. По его мнению, организмам присуща «быстрая» и «медленная» системы динамического реагирования нервной системы на электромагнитное воздействие. На уровне ЭЭГ-реакций «быстрая» система проявляет себя реакциями десинхронизации (подавление θ - и α - активности) через доли секунд или секунды после начала или после прекращения воздействия, а «медленная» - в реакции синхронизации (усиление δ -, α - и σ -волн) ЭЭГ, возникающей с латентным периодом в единицы-десятки секунд и отличающаяся большой длительностью, в том числе сохраняющейся в период последствия. ЭЭГ-эффекты можно наблюдать при низких уровнях воздействия (единицы мВт/см и ниже) как немодулированными, так и модулированными низкими частотами (единицы – десятки Гц) радиочастотными ЭМИ. Наиболее чувствительными (по ЭЭГ-критериям) к воздействию оказались кора головного мозга, ответственная за высшие психические функции и координацию поведенческих реакций), а так же гипоталамус, подкорковая структура, ответственная за интеграции вегетативных функций организма. Менее чувствительными подкорковыми структурами оказались гиппокамп, структура, играющая важную роль в организации памяти и эмоций, а так же ретикулярная формация, ответственная за неспецифическую активацию коры. Модулированное воздействие, как правило, оказывает более сильное влияние на ЦНС и при этом в ЭЭГ появляются или усиливаются колебания электрической активности, соответствующие частотам модуляции или их гармоникам. ЭЭГ отображает функционирование большого количества (ансамбля) нейронов. Есть много данных в пользу того, что ЭЭГ-реакции на электромагнитное воздействие являются «эхом» того влияния, которое оказывает радиочастотное ЭМИ непосредственно на нервные клетки. Поскольку нейрон является основной структурно-функциональной единицей нервной системы, необходимо поподробнее остановиться на имеющихся данных относительно

прямого влияния радиочастотных излучений на функционирование нервных клеток и возбудимость нервных волокон.

В работе Каменского (1964, 1968) показано, что облучение препарата нерва лягушки не модулированным ЭМИ (2400 МГц, 11 мВт/см²), приводило к увеличению скорости проведения возбуждения на $16 \pm 4,5\%$ и незначительному укорочению фаз абсолютной и относительной рефрактерностей. При высоких уровнях интенсивности облучения (до 1000 мВт/см²) обнаружилось двухфазное изменение амплитуды биопотенциалов. В другой работе, выполненной так же на препарате нерва лягушки (Р.Э. Тигранян, В.В. Тяжелов, 1982), исследовалось влияние импульсов ЭМИ, воздействовавших на препарат синхронно с развитием ПД в нерве. Показано, что при импульсном воздействии (800 МГц, ППР 80 мВт/см²) в фазу латентного периода через 25-30 минут воздействия на 34% уменьшалась скорость проведения возбуждения, на 91% уменьшалась амплитуда ПД и на 200% увеличивался период абсолютной рефрактерности. Макри и Вахтель (D.I. McRee & H. Wachtel, 1980, 1982, 1986) исследовали влияние микроволн 2,45 ГГц на нерв лягушки и установили, что облучение с УПМ 10 мВт/г и выше увеличивало латентный период и уменьшало амплитуду ПД на второй стимул. Чу и Гай (C.K. Chou & A.W. Guu, 1978) исследовали влияние немодулированных и импульсно модулированных микроволн на блуждающий нерв кролика. Используя воздействия интенсивностью 0,3-1500 мВт/г в немодулированном режиме и 300-22000 мВт/г импульсной мощности в импульсно модулированном режиме, они обнаружили изменения в параметрах ПД после 5 минут воздействия, аналогичные тем, что могут инициироваться просто повышением температуры. Констатировалось отсутствие нетепловых эффектов и предполагалось наличие тепловой модели влияния. Все вышеприведённые результаты указывают на то, что воздействие радиочастотными ЭМИ изменяет возбудимость нервных волокон, образованных аксонами нервных клеток.

А как реагируют на воздействие сами нейроны. На мозге кроликов исследовалось влияние ЭМИ с длиной волны 12,5 и 37,5 см и ППЭ 0,1- 40 мВт/см² на электрическую активность нейронов коры (Р.А. Чиженкова, 1969, 1987, 1999). Регистрировалась фоновая или вызванная активность нейронов без воздействия и после облучения. Выяснилось, что воздействие изменяло среднее значение частоты спонтанной импульсной активности у половины клеток (торможение или активация). Влияние ЭМИ на вызванную активность было более существенно и однонаправленно и заключалось в том, что облегчались реакции нейронов на свет, т.е. проявлялось его коррегирующее действие. При низкоинтенсивном влиянии (ППМ 0,1 - 0,5 мВт/см²) облучение не изменяло среднюю частоту потенциалов действия. Статистически значимо изменялись временные характеристики межимпульсных интервалов: происходило увеличение длительности максимальных интервалов между соседними потенциалами действия, при некотором укорочении средних по длительности интервалов, а так же изменялся характер групповой активности. Высказано предположение, что подобная перестройка импульсных потоков в нейронах ЦНС является чувствительным показателем (индикатором) не теплового влияния ЭМИ на ЦНС.

В другом исследовании (М.И. Яковлева, 1973) изучалось влияние СВЧ-поля на электрическую активность нейронов коры головного мозга крыс. Животные подвергались однократным 30-минутным облучениям с ППМ 5 мВт/см² и трёхкратным (3 дня подряд) облучениям с ППМ 15 мВт/см². Облучение проводилось за 1-3 часа до опытов с записями нейрональной активности. У крыс облучённой группы при погружении электрода в кору с 1-ого по 6-й слой отмечалось меньше спонтанно активных клеток (2-5 против 8-9 в контрольной группе. Частота фоновой спонтанной активности нейронов коры облучённых крыс была ниже, чем у контрольных. Величина эффекта была примерно пропорциональна дозе облучения. Отмечено так же, что после облучения меньшее количество клеток реагирует на звуковое и

болевое раздражение. Для выявления чувствительности нейронов подкорковых структур мозга к действию дециметрового ЭМИ изучалась спайковая активность нейронов дорзального гиппокампа, ядер таламуса и мезэнцефалической ретикулярной формации кроликов (В.Р. Файтельберг-Бланк, Г.М. Перевалов, 1977). Животные облучались ЭМИ 460 МГц с ППЭ 2 и 5 мВт/см² в течение 10 минут. После облучения по характеру реагирования на воздействие нейроны могут быть разделены на 3 группы: 1) частота ПД значимо увеличивалась после воздействия (возбудительный тип реакции); 2) частота ПД значимо снижалась после облучения (тормозный тип реакции); 3) не реагирующие значимым изменением частоты ПД. В экспериментах на кошках исследовалась спонтанная электрическая активность клеток Пуркинье мозжечка непосредственно во время облучения (А.А. Магеррамов, 1987). Голова животных подвергалась воздействию ЭМИ 460 МГц с ППМ от 80 до 1100 мВт/см². При однократном облучении частота спонтанной активности увеличивалась приблизительно пропорционально ППМ. Повторное облучение усложняло картину эффекта. В частности, для ППМ 1000-1200 мВт/см² вначале отмечалось повышение частоты в 3-5 раз от исходного уровня после чего развивалось торможение. Таким образом, изменения спонтанной и вызванной электрической активности нейронов, инициированные воздействием ЭМИ, позволили утверждать авторам исследований о прямом влиянии радиочастотного облучения на нервные клетки. Причём в качестве мест приложения влияния рассматривались и сома нейронов, и нервные отростки окончания, и глиальные элементы окружения.

На препаратах ганглия морского моллюска аплизии исследовалось влияние не модулированного ЭМИ 1,5 ГГц и 2,45 ГГц при УПМ 5 - 100 Вт/кг на электрическую активность (ЭА) пейсмекерных нейронов (Н. Wachtel et al., 1975; R.L. Seaman et al., 1978). После 1-3 минут облучения в 87% опытов регистрировалось торможение ЭА, которое проявлялось в уменьшении количества ПД за единицу времени относительно исходного уровня. Пороговое значение УПМ для торможения ЭА пейсмекерных нейронов

оказалось равным приблизительно 7 мВт/г, что было существенно ниже порога не пейсмейкерных клеток, оказавшегося равным 50 мВт/г. Величина эффекта была приблизительно пропорциональна УПМ и кинетики откликов соответствовали кинетикам нагрева физиологического раствора с препаратами. Поэтому авторы сделали заключение о тепловой природе подобного влияния. Помимо этого R.L. Seaman & H. Wachtel (1978) при облучении нейронов морского зайца аплизии ЭМИ, импульсно модулированным частотой 5 кГц, при длительности импульса 0,5 мкс и пиковой УПМ 400 мВт/г, наблюдали реакцию, названную "быстрой". Данная реакция развивалась немедленно после начала воздействия и заключалась в кратковременном, в течение нескольких секунд, усилении ЭА, которая затем градуально уменьшалась до исходного уровня. Облучение существенно не повышало температуру раствора с препаратом (из-за малости среднего значения ППМ, равного 1 мВт/г и менее), поэтому авторы предположили, что "быстрая" реакция имеет не тепловой механизм формирования. Реакция может быть обусловлена либо кратковременными входящими в клетку токами, индуцированными импульсным ЭМИ или как-то опосредоваться изменённым содержанием медиаторов в околоклеточном пространстве.

.На идентифицированных нейронах моллюска М.А. Большаковым в 80-е годы показано, что воздействие немодулированного ЭМИ 900 МГц при УПМ 8-10 Вт/кг формирует динамическую реакцию, в ходе которой меняется текущая частота электрической активности нейронов (рис. 23).

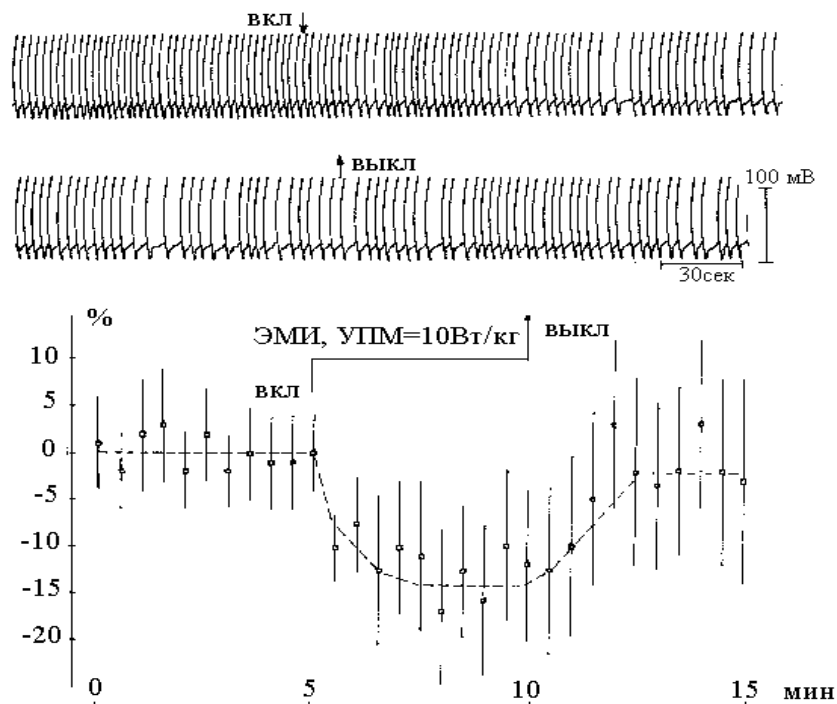


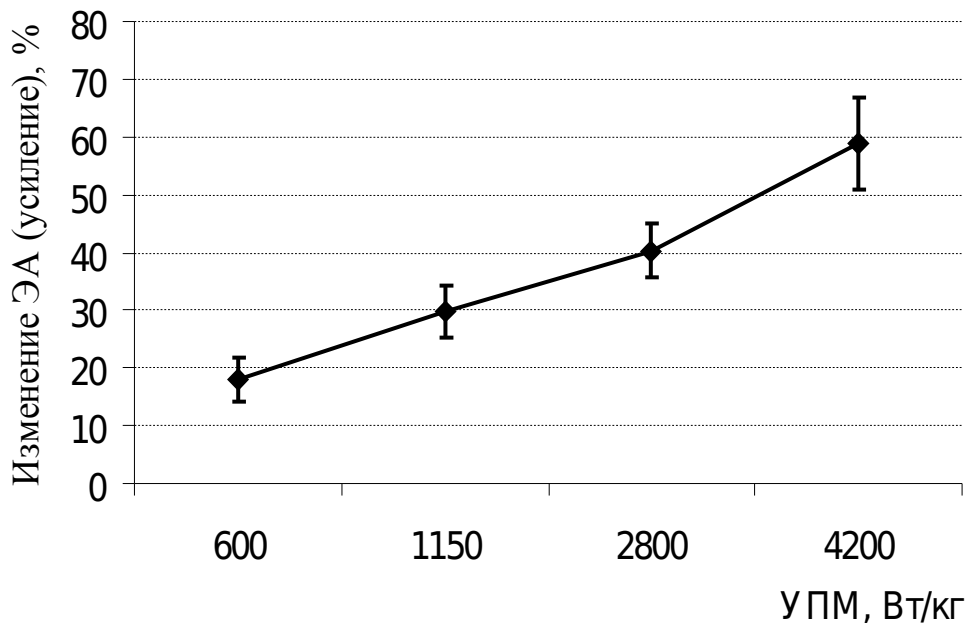
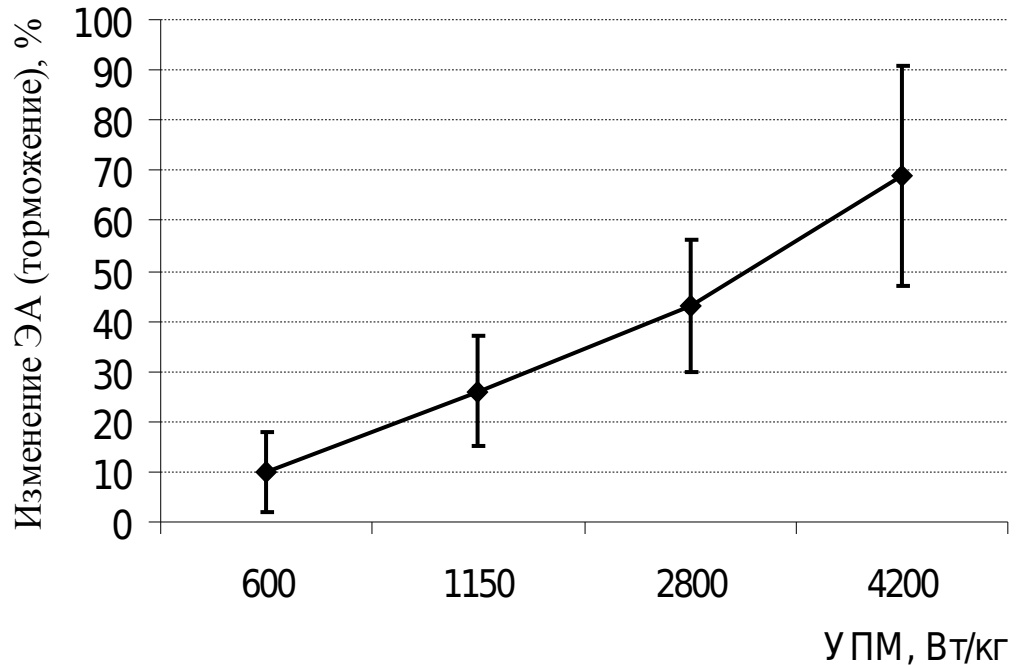
Рисунок 23. Влияние ЭМИ 915 МГц на ЭА нейрона БП-4.

В среднем эффект торможения достигал величины 15% на 2-4 минутах воздействия. После прекращения облучения уровень спонтанной ЭА сложным образом возвращался к исходному значению или стабилизировался на уровне ниже исходного. При этом воздействие не меняло форму или амплитуду потенциалов действия. В основе подобного реагирования лежит тепловой механизм. Он заключается в том, что во время воздействия происходит электромагнитный нагрев со скоростью 0,001 – 0,002 градус/сек, в результате активизируется работа активного транспорта. Ионы натрия выкачиваются из нейронов в большем количестве, чем закачиваются в клетку ионы калия. За счёт этого мембрана нейронов гиперполяризуется и интервалы между последовательными потенциалами действия увеличиваются, т.е. электрическая активность тормозится. Через 3 – 5 минут воздействия этот режим выключается и начинает развиваться вторая фаза теплового реагирования, а именно, деполяризация мембраны с усилением активности. Подобные реакции можно моделировать обычным нагреванием нейронов с требуемой скоростью роста температуры. Такой тип

реагирования удобно наблюдать при действии на нейроны интенсивным ЭМИ, когда есть заметное тепловыделение и нагрев. Рис.24 иллюстрирует полученные зависимости. Таков характер реагирования на немодулированное электромагнитное воздействие.

ЭМИ, импульсно модулированное низкими частотами (единицы – десятки Гц) влияет на электрическую активность нейронов более сложным образом. Проведенные эксперименты показали, что в ответ на действие низкоинтенсивным ИМ ЭМИ с частотами модуляции 40 и 100 Гц (средняя УПМ 0,5 Вт/кг) значимых изменений ЭА не наблюдалось. Воздействие ИМ ЭМИ,

ВТ/КГ
26).
начал
При в
частот
но зна



,5
ис.
за
ис.
ex
А,

Рис. 24. Влияние ЭМИ КВЧ на ЭА нейрона БП-4. Представлены зависимости относительного изменения ЭА (в % к контролю) от УПМ.

Проведенный анализ результатов позволяет утверждать, что основной тип реагирования на ИМ ЭМИ с УПМ 0,5 Вт/кг - это урежение, учащение ЭА (в 70%-90% случаев) с максимальной величиной отклика не более 40%. При более интенсивном воздействии (2 и 4 Вт/кг) наблюдалось преимущественно учащение ЭА (от 50 до 100% случаев) с усреднёнными максимальными откликами так же не более 40%.

В процессе изучения эффектов импульсно модулированного ЭМИ обнаружено, что пейсмекерные нервные клетки помимо фазного, медленного изменения ЭА могут реагировать внезапным, кратковременным (порядка 5-10 секунд) быстрым усилением спонтанной активности, при котором вместо 2-5 ПД возникает 10 - 30 спайков с меньшей (на 2 -10 мВ) амплитудой (рис.25). Эффект внешне напоминал отдельную "пачку" ПД при пачечном режиме генерации (по-английски "birst" - "вспышка"), поэтому подобный тип реагирования был назван вспышечным.

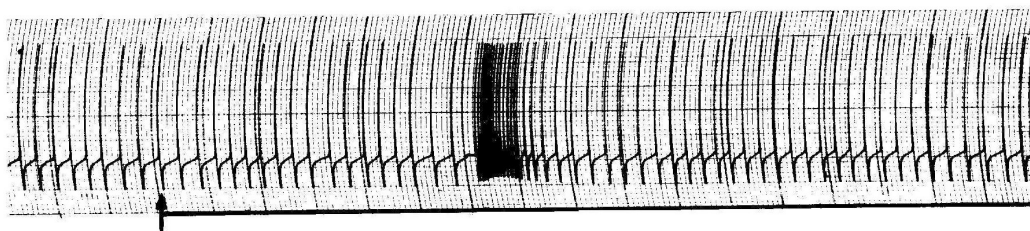


Рис. 25 . Реакция по типу «вспышка» нейрона БП-4 из мозга большого прудовика на воздействие (стрелка) ИМ ЭМИ.

«Вспышечный» тип реагирования, в принципе, может оказаться индикатором крайне неблагоприятного влияния, оказываемого ЭМИ на организм человека. По мнению А.М. Гутмана (1984) «вспышечный» характер реагирования может отображать пребывание нейрона в состоянии «устойчивой деполяризации», а это является клеточным коррелятом (отображением) эпилептиформной активности мозга (если речь вести о целом мозге). Вполне допустимо, что импульсное ЭМИ в состоянии инициировать или провоцировать приступы эпилептической болезни у человека. В

экспериментах на животных эпилептиформная активность мозга демонстрировалась неоднократно (Ю.А. Холодов, 1975).

В регуляции возбудимости мембран нервной клетки важную роль играют ионы кальция, поскольку они во много обеспечивают поверхностный заряд мембраны, сопрягают внеклеточное пространство с внеклеточными процессами. Кроме того, в нейронах моллюсков Ca^{2+} в значительной мере определяют формирование ПД Основываясь на функционально важной роли кальция, проведено исследование эффектов воздействия микроволнового излучения на кальциевый ток диализированных нейронов прудовика. Показано, что ЭМИ 900 МГц, не модулированное и импульсно модулированное в полосе частот 0,5-1000 Гц, увеличивает Ca^{2+} -ток. Эффект оказался пропорционален УПМ в пределах 0,1 - 20 Вт/кг и полностью определялся электромагнитным нагревом.

Реакции других критических систем на воздействие ЭМИ.

Сердечно-сосудистая система.

Сердечно-сосудистая система обеспечивает организм доставкой кислорода, питательных веществ во все органы и выносит из них вредные и не нужные продукты метаболизма. Воздействия достаточно слабой по величине энергии ЭМИ (10 мкВт/см – 10 мВт/см) на организм животных чаще может приводить к нарушениям ритма сердечных сокращений и уровня кровяного давления. Особенно сильное влияние на функционирование сердца оказывают импульсные микроволны. Тиграняном (1983) было показано, что воздействие микроволновыми импульсами на сердце лягушки, синхронно попадающими в «зону уязвимости» - непосредственно перед развитием QRS-комплекса электрокардиограммы, приводит к увеличению периода сердечных сокращений (снижению частоты сердечных сокращений), а затем и к полной остановке сердца. При синхронном воздействии микроволновыми импульсами в моменты Р, R, Т – зубцов на электрокардиограмме наблюдалось скачкообразное изменение сердечного ритма.

У людей, профессионально связанных с источниками радиочастотных ЭМИ, т.е. хронически подвергшихся воздействию низкоинтенсивных электромагнитных полей (не более 10 мВт/см), отмечались нарушения функционирования сердца. Фиксировались боли в области сердца, нарушения артериального давления (чаще гипотония), вариации пульса и частоты сердечных сокращений. Менялась картина периферической крови, в частности, отмечались понижение числа эритроцитов, лейкоцитов и нейтрофилов. Нарушения довольно стойки, сохраняются в течение нескольких месяцев после прекращения контактов с источниками ЭМП. В целом ряде случаев возникала необходимость в госпитализации и перевода людей на другие виды работы, не связанные с радиочастотными излучениями.

При микроволновых воздействиях с интенсивностями десятки и сотни мВт/см формируются реакции, характерные для теплового стресса. На различных лабораторных животных (мыши, крысы, собаки) показано, что с увеличением интенсивности и длительности облучения увеличивается частота сердечных сокращений и дыхательных движений. В частности, облучение собак с ППЭ 100 мВт/см в течение 60 минут повышает частоту сердечных сокращений в 3 раза и при этом часть животных погибала от перегрева. Воздействие с ППЭ 300 и 500 мВт/см оказывает ещё более выраженное влияние: в течение нескольких минут частота сердечных сокращений удваивается, затем снижается, и на фоне развивающегося теплового стресса часть животных погибает от микроволнового перегрева.

Эндокринная система. Эндокринная система организма представляет совокупность желез внутренней секреции и клеток-продуцентов, обеспечивающих организм различными гормонами, участвующими в регуляции физиологических функций.

На лабораторных животных (собаках, белых крысах) установлено, что эффект влияния ЭМИ зависит от интенсивности электромагнитного воздействия, точнее, от величины поглощённой дозы микроволновой

энергии. При многократных воздействиях с УПМ порядка 3-4 Вт/кг с суммарной поглощённой дозой 50 кДж/кг значимых нарушений фона гормонов, как правило, не наблюдалось. Изменения уровня гормонов ГГА-системы наступают при воздействиях с УПМ 7-8 Вт/кг (~100 кДж/кг) и наибольший эффект наблюдается после воздействий с УПМ 12 Вт/кг (~180-200 кДж/кг). Подобная картина изменений трактуется Б.И. Давыдовым с как адаптация организма к микроволновому облучению по схеме тепловой нагрузки, т.е. пусковым механизмом является тепловой эффект электромагнитного воздействия. Получены данные, указывающие на повышение 17-окси- и 17-кеиостероидов при слабых, нетепловых уровнях ЭМИ. Меняется так же уровень тиреотропного гормона, соматостатина и других.

Иммунная система. Иммунная система человека и всех млекопитающих представлена группой органов (лимфатические узлы, вилочковая железа-тимус, селезёнка, костный мозг), а так же специализированными клетками, постоянно циркулирующими в кровяном русле. Эта система обеспечивает организму иммунитет, т.е. способность защищаться от генетически чужеродных тел и веществ. По имеющимся к настоящему времени данным радиочастотные ЭМИ способны оказывать неблагоприятное влияние на иммунологические реакции организма, хотя не исключено, что при малых интенсивностях облучения (1- 100 мкВт/см²) происходит стимуляция функций иммунитета. Примером стимуляции может быть модифицирующее влияние ЭМИ 2450 МГц (1 мкВт/см², 10 суток по 30 минут) на введение лошадиной сыворотки морским свинкам. У животных, не подвергавшихся воздействию ЭМИ, введение сыворотки вызывало анафилактический шок, приводящий в 100% случаев гибели животных в течение 2,5-3 минут. В группе облучённых животных от анафилактического шока погибло только 50% животных что указывает на возможность влияния ЭМИ низких интенсивностей на процессы иммунитета (Ю.Г. Григорьев с соавт.,1999).

При более интенсивных воздействиях (500 мкВт/см^2 и выше) происходит подавление иммунитета, изменения связаны с повышением температуры вследствие поглощения энергии ЭМИ. В известном смысле это парадоксально, т.к. в нормальных условиях повышение температуры в организме активирует систему иммунитета. ЭМИ может выступать как индуктор аутоиммунных реакций. В нормальных условиях организм обеспечен иммунологической толерантностью, т.е. иммунная система организма не реагирует на свои собственные белки. Однако, под влиянием ЭМИ: облучение морских свинок при ППЭ 50 и 500 мкВт/см^2 в течение 30 дней по 7 часов ежедневно, специфическая иммунная реакция направляется против собственных тканей облучённых животных. Как полагают, влияние ЭМИ низких и высоких уровней интенсивности угнетает Т-систему иммунитета что способствует реализации аутоиммунных реакций.

Катаракта. Специфическим биологическим действием ЭМИ принято считать образование катаракты в хрусталике глаза. При этом большинство исследователей придерживаются тепловой этиологии (причины) катаракт (помутнение хрусталика глаза). Как полагают, например, Артур Гай, помутнение хрусталика под действием микроволнового излучения является именно повышения температуры в нём. Если на фоне действия ЭМИ обеспечить эффективный теплоотвод от хрусталика или охлаждать весь организм, то катаракта не возникает. В экспериментах на кроликах показано, что при однократном интенсивном микроволновом облучении кроликов в ближней зоне, катаракта развивалась при пороговом для данного паталогического процесса нагреве не менее 41 градуса. Важно при этом отметить одну особенность. Локальный нагрев хрусталика не электромагнитным способом до 42 градусов в течение 30 минут не приводил к помутнению хрусталика. В то же время многократное облучение ЭМИ низких уровней интенсивности, не вызывавшее подъёма температуры хрусталика, при достаточной продолжительности и числе повторных облучений, инициирует возникновение катаракты. Результаты этих

экспериментов свидетельствуют, что катарактообразование под действием микроволн не является сугубо тепловым эффектом. Зависит от других факторов: от характера поглощения электромагнитной энергии глазом и накопления повреждений (кумуляции эффекта) при многократных, повторяющихся воздействиях. Появление катаракты является одним из профессиональных заболеваний у лиц, эксплуатирующих или регулирующих приборы и устройства, генерирующие радиочастотные ЭМИ. Не исключено, что катарактогенез может развиваться у представителей живой природы, находящихся в зоне действия излучений радиолокационных, радиорелейных и телевизионных станций, станций космической и прочих связей. В настоящее время данный вопрос не исследован и остаётся актуальным.

Репродуктивная функция. Репродуктивная система особей обоего пола реагирует на воздействие ЭМИ. При воздействии ЭМИ тепловых интенсивностей на животных наблюдалось снижение репродуктивной способности самок, нарушение эстрального цикла, снижение функционального состояния сперматозоидов и тератогенные последствия. Многочисленными клиническими исследованиями установлено, что в яичниках возникают различные морфологические изменения, снижается фонд фолликулов, наблюдается дегенерация фолликулов и ооцитов. Всё это приводит к снижению плодовитости. Семенники реагируют нарушением своего функционирования, что приводит к более раннему в возрастном аспекте проявлению импотенции и стерильности организма. Сперматогенез и семенники можно рассматривать как универсальную тест-систему, позволяющую оценивать биологическую эффективность различных видов облучения.

Контрольные вопросы.

1. Сущность понятия «электромагнитное загрязнение» среды.

2. Каковы основные источники радиочастотного электромагнитного «загрязнения»?
3. Причины повышенной экологической значимости «электромагнитного загрязнения» среды.
4. Какие физиологические системы организма критичны к воздействию ЭМИ?
5. Каков общий характер реагирования ЦНС на воздействие ЭМИ РЧ?
6. Какие структуры головного мозга наиболее чувствительны к электромагнитному воздействию?
7. Как действует ЭМИ РЧ на нервные волокна?
8. Каковы основные эффекты влияния микроволн на нейроны моллюсков?
9. Что представляют тепловые и нетепловые эффекты влияния ЭМИ на нейроны?
10. Что представляет «вспышечный» тип реагирования нейронов?
11. Как влияет ЭМИ РЧ на функционирование сердечнососудистой системы?
12. Каков характер влияния ЭМИ на эндокринную систему?
13. Как влияет облучение на состояние иммунной системы?
14. Что такое катаракта глаза и как развивается при воздействиях ЭМИ?
15. Как ЭМИ РЧ влияет на репродуктивную систему организма?

ДЕЙСТВИЕ ЭМИ НА ИНДИВИДУАЛЬНОЕ РАЗВИТИЕ ОРГАНИЗМОВ.
ОНТОГЕНЕЗ *Drosophila melanogaster* В УСЛОВИЯХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.

- Значительные нарушения под действием электромагнитных полей могут происходить в процессе формирования организмов: в эмбрионе, в зародыше, в период развития и роста. На этих стадиях биологические процессы могут быть не только нарушены, но и полностью подавлены. Различные электромагнитные поля могут вызывать тератогенные эффекты (уродства, морфозы, резорбция плода) при облучении беременных самок теплокровных животных на ранних стадиях развития плода (F.Dietzel, 1975). Фактор окружающей среды, воздействующий на организм в некоторые моменты индивидуального развития и оказывающий неблагоприятное влияние на эмбриональное развитие, считается тератогенным (П.Г. Светлов, 1960, 1978. Наиболее чувствительными периодами тератогенеза являются критические стадии развития зародыша, соответствующие периодам раннего органогенеза.

Удобным модельным объектом для изучения тератогенного действия ЭМИ в индивидуальном развитии является дрозофила.

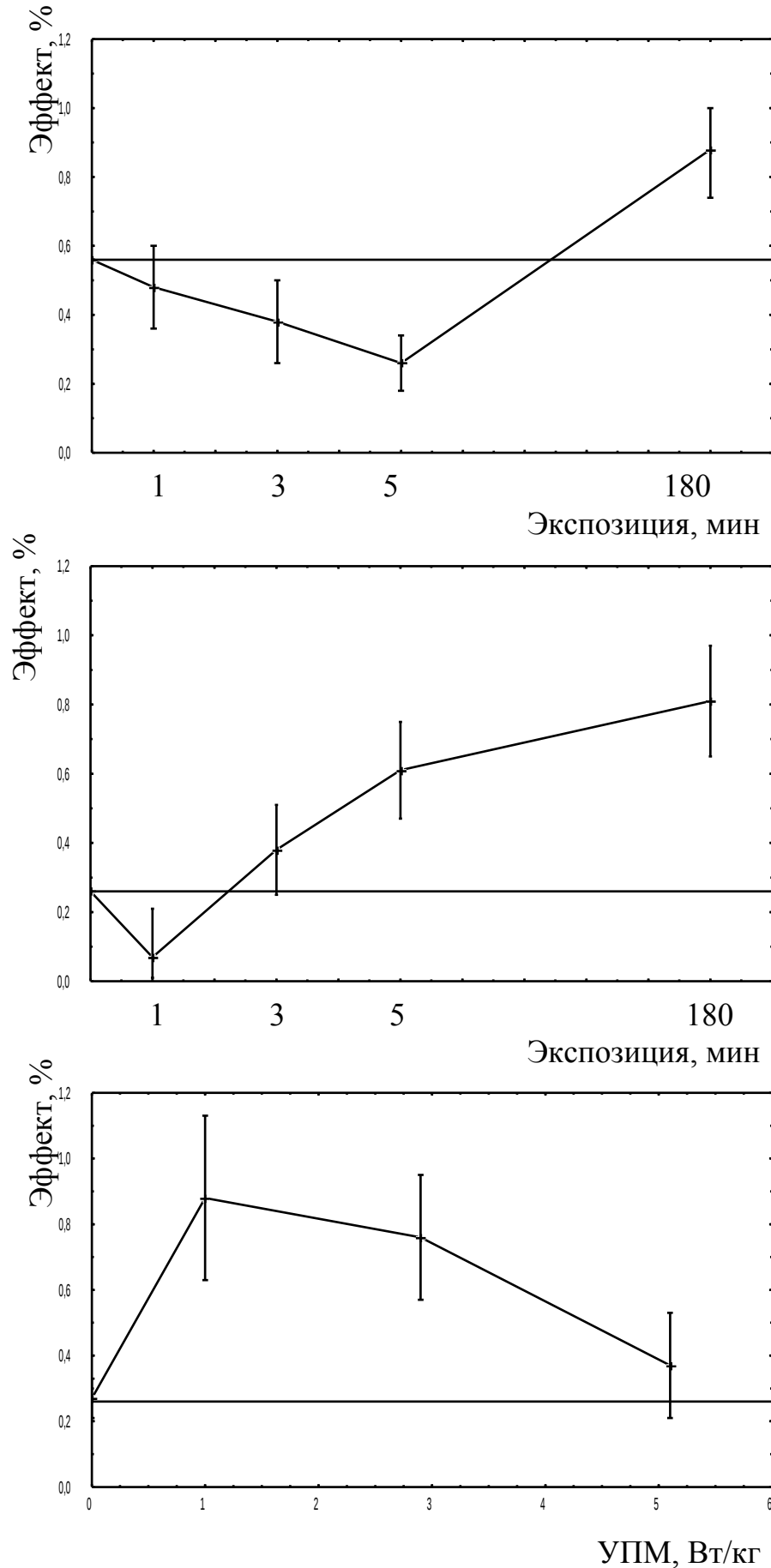
- индивидуальное развитие дрозофилы от оплодотворенной яйцеклетки до вылета имаго хорошо изучено
- возраст эмбриона достаточно точно определяется по кладке яиц;
- существующие методы работы с популяциями дрозофил позволяют увеличить эффективный объем выборки до нескольких тысяч особей, и обнаруживать эффекты появляющиеся с вероятностью менее 1%.

Плодотворность использования дрозофилы в качестве тест-объекта была продемонстрирована целым рядом работ, в которых обнаружены общие закономерности тератогенного влияния радиочастотных ЭМИ. В частности, Беляевым с соавт. (1990) получены данные что ЭМИ КВЧ-диапазона оказывает влияние на развивающийся организм дрозофил. Эмбрионы на стадиях бластулы, гастролы (2,5 – 3 часа) и куколки облучались в волноводе на частотах 46,35 ГГц, 46,42 ГГц, 46,50 ГГц в течение 4 – 4,5 часов при мощности 0,1 мВт/см². Облучение на частоте 46,35 ГГц инициировало значимые изменения в развитии, а на частотах 46,42 и 46,5 ГГц эффекты не были значимыми. Облучение куколок приводило к увеличению количества нарушений развития (терат, морфозов) в 2 – 4,5 раза, но эти изменения не влияли на вылет имаго. Облучение эмбрионов снижало вылет имаго примерно на 30% и повышало процент наблюдаемых дефектов развития. По мнению авторов, воздействие указанными миллиметровыми волнами нарушают ДНК - белковые взаимодействия, которые определяют реализацию генетической информации.

В исследованиях М.А. Большакова продемонстрирована зависимость эффектов нарушения развития дрозофилы от возраста на момент воздействия, интенсивности ЭМИ, продолжительности, частоты модуляции и сочетании с другими факторами. Эмбрионы дрозофил 2-х возрастов (4-5 часов и 13-14 часов) подвергались облучению с длительностями 1 минута, 3 минуты, 5 минут и 3 часа при удельной поглощенной мощности (УПМ) 1, 3 и 5 Вт/кг. Установлено, что 5-минутное и 3-часовое облучение эмбрионов возраста 13-14 часов увеличивало число имаго с изменённой формой конечностей с $0,26 \pm 0,05$ в контроле до $0,60 \pm 0,14$ и $0,80 \pm 0,16$ в опыте (рис.26). Воздействие ЭМИ в течение 1 минуты снижало процент появления морфозов конечностей до 0,07%, что недостоверно меньше данных в контроле. Количество крыловых морфозов в результате действия ЭМИ на 13-14 часовые эмбрионы значимо не отличалось от контрольных значений. После облучения эмбрионов в возрасте 3-4 часов отмечено неоднозначное

изменение числа морфозов ног и крыльев. 1-, 3- и 5-минутные экспозиции уменьшали число наблюдаемых морфозов крыльев (максимальный эффект после 5 минут воздействия - $0,26 \pm 0,08\%$ против

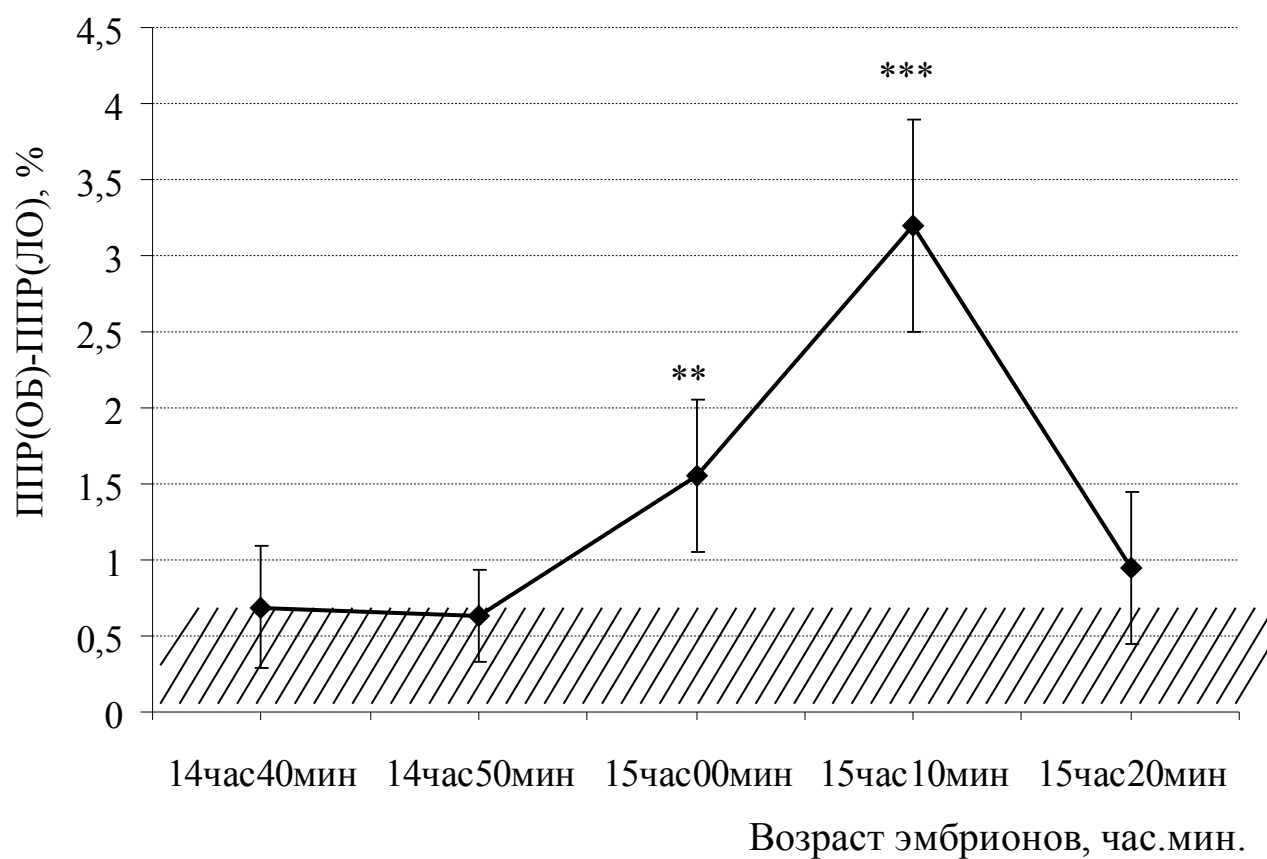
Рис.26. Влияние ЭМИ 460 МГц на процентное количество морфозов эмбрионов дрозофилы.



0,66±0,07% в контроле. После 3-часового воздействия ЭМП процент обнаруженных морфозов увеличился до 0,83±0,07% (рис.27). Аналогичная зависимость проявилась после облучения эмбрионов 13-14 часового возраста (0.164±0,07% по сравнению с контролем 0,05±0.15%. Рисунок демонстрирует зависимость появления процента нарушения развития крыльев (верхний рисунок), ног (нижний рисунок) от длительности воздействия, и зависимость появления дефектов ног от уровня УПМ.

Множественное проявление эффекта в виде различных морфозов (терат) существенно осложняет количественную оценку эффектов влияния ЭМИ и установления общих закономерностей. Поэтому в качестве индикатора влияния ЭМП стали использовать показатель, отображающий интегральный эффект влияния -гибель организма. Показатель оценивается как величина процента прерванного развития (ППР), рассчитываемого по проценту не вылета мух имаго из соответствующих кладок яиц, число которых принимается за 100%. ППР оказался удобным показателем и при его использовании были обнаружены критические периоды в развитии дрозофилы по отношению к радиочастотному ЭМИ и повышенной температуры. По индикатору ППР эмбрионы дрозофилы любых возрастов (1 час, 5 часов и 15 часов после откладки яиц мухами) оказались не чувствительными к воздействию немодулированным ЭМИ с УПМ менее 5 – 6 Вт/кг. В то же время кратковременное, 5-минутное облучение эмбрионов возраста 15 часов статистически значимо увеличивало ППР. Максимальный эффект влияния был обнаружен после воздействия на эмбрионов возраста 15 часов 10 минут. Разница в возрасте на 10 минут (раньше - позже) существенно уменьшала величину ППР. Следовательно, критическим периодом является возраст эмбрионов на момент воздействия 15 часов 10 минут.

Рис.27. Зависимость эффекта воздействия ЭМИ (460 МГц, УПМ 6 Вт/кг,



экспозиция 5 минут) от возраста эмбрионов дрозофилы в момент облучения.

Действие импульсно модулированного ЭМИ на эмбриогенез дрозофилы. Результаты проведенных экспериментов показали, что 5-минутное воздействие ЭМИ 460 МГц, импульсно модулированное частотами в пределах 2,5-40 Гц при скважности 25 и средней УПМ 0,12 Вт/кг (импульсная УПМ 3 Вт/кг) оказывает влияние на эмбрионов дрозофил тест-возраста (15 часов 10 минут). Увеличивается число ППР в облучённых популяциях по сравнению с ППР в контрольных группах. При всех частотах модуляции ППР в группах с облученными эмбрионами была значимо больше по сравнению с ППР в контрольных группах (рис.28). Эффект воздействия явно зависел от частоты модуляции. После облучения ЭМИ, импульсно модулированного частотами 2.5, 6, 22 и 40 Гц, ППР в облученных группах превышал этот показатель в группе «ложного облучения» в 2-3 раза. Эффект на этих частотах модуляции составил 6-7%, то есть на такую величину ППР в облучённых группах превышал ППР в "ложно облучённых".

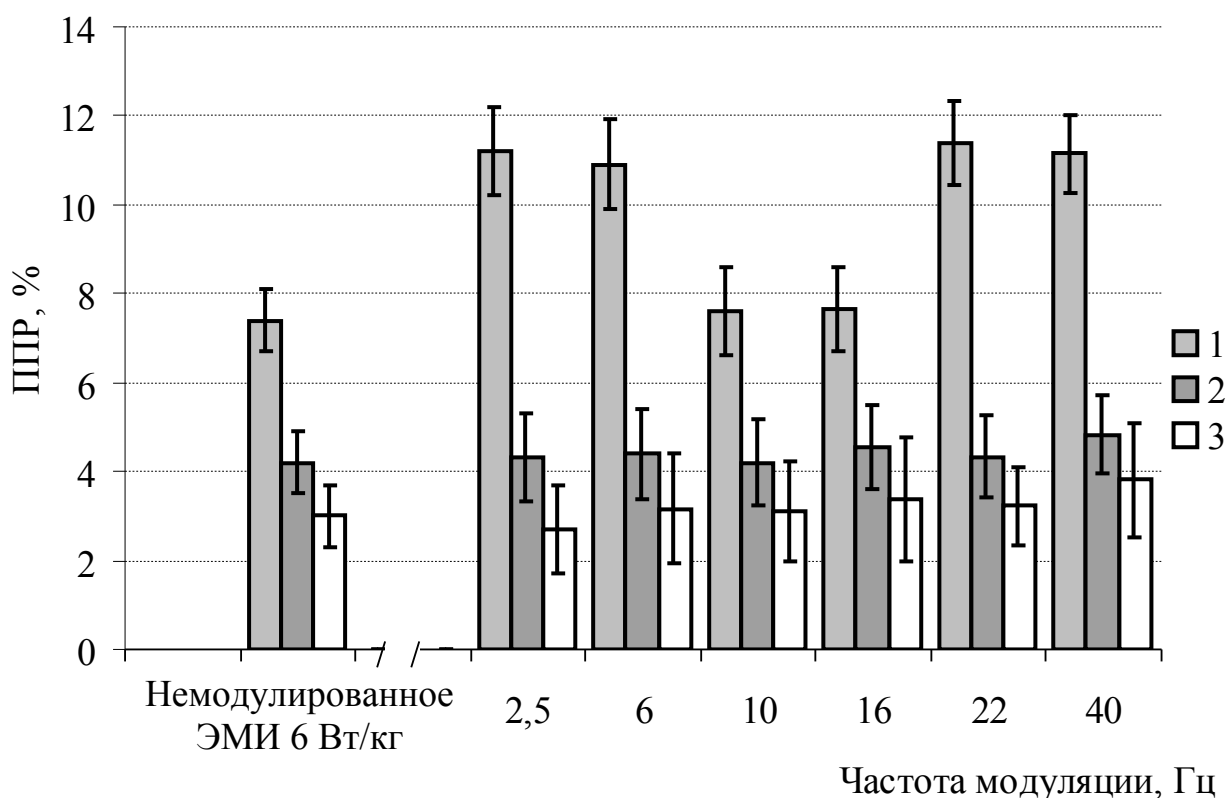


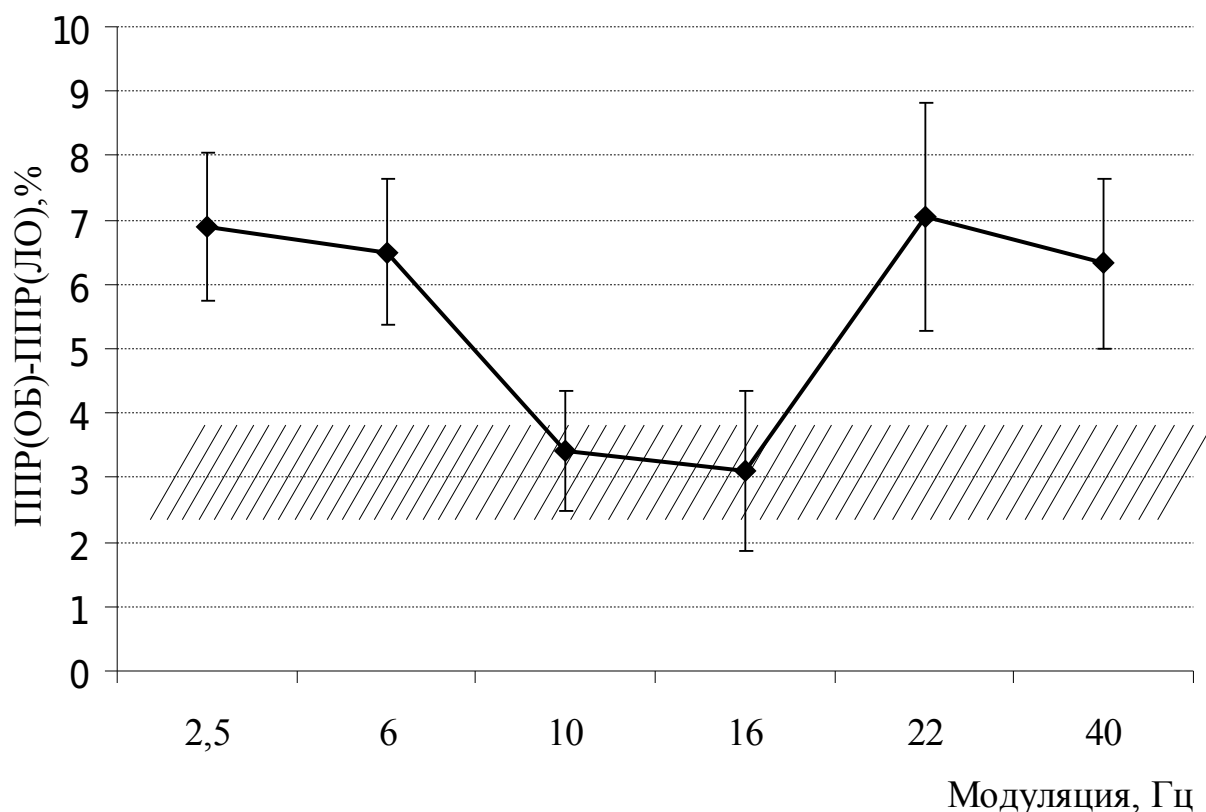
Рис. 28. Влияние импульсного ЭМП 460 мГц на величину процентов прерванного развития эмбрионов дрозофил. Для сравнения приведены результаты 5-минутного немодулированного воздействия с УПМ 6 Вт/кг.

Примечание: 1- ППР после облучения; 2- ППР "ложно облученных" групп; 3- ППР в контроле.

На остальных частотах модуляции, при 10 и 16 Гц, результат воздействия оказался меньше. ППР достигал величины $7,6 \% \pm 0,9\%$ и $7,7 \% \pm 0,9\%$ соответственно. Эффект по величине ($3,4\%$ на 10 Гц и $3,1\%$ на 16 Гц) значимо ($p \leq 0,05$) от эффекта на остальных частотах модуляции (рис.).

Следовательно, эффект импульсно модулированного излучения близок по величине эффекту немодулированного ЭМИ с УПМ 6 Вт/кг. То есть, ИМ ЭМИ при средней УПМ, в 50 раз меньшей УПМ немодулированного облучения, инициирует сопоставимые по величине эффекты. Биологическая эффективность воздействия импульсно-модулированного ЭМИ на индивидуальное развитие дрозофил значительно больше по сравнению с немодулированным ЭМИ.

Рисунок 29. Зависимость эффекта воздействия ЭМИ с несущей частотой



460 МГц, рассчитанного как разность ППР между облученной и контрольной группами эмбрионов, от частоты модулирующего сигнала (средняя УПМ 0,12 Вт/кг). Штриховкой обозначен уровень эффекта при немодулированном микроволновом воздействии

Полученные результаты коррелируют с частотнозависимыми эффектами, обнаруженными и исследованными Эйди. В опытах Эйди воздействие ЭМИ 147 МГц при частотах модуляции в пределах 0,5-32 Гц увеличивало выход ионов кальция из тканей мозга, статистически значимый эффект наблюдался на частотах 6, 9, 11, 16 и 22 Гц с максимумом на 16 Гц. В настоящей работе, как уже отмечалось, на частотах модуляции 10 и 16 Гц эффект оказался меньше, чем при остальных частотах. То есть, на частотах, которых в опытах Эйди эффект был наибольшим, в настоящей работе, на эмбрионах эффект оказался наименьшим. Эффекты Эйди получены на тканях мозга, в то время как в данной работе исследуется влияние ИМ ЭМИ на эмбриогенез. Эйди использовал режим амплитудной модуляции, а в данной работе ЭМИ являлось импульсно модулированным. Не исключено, что эффект влияния ЭМИ на эмбрионы дрозофил при частотах модуляции 2,5, 6,

22 и 40 Гц имеет исключительно тепловую природу, то есть определяться способностью эмбрионов реагировать на скорость нагрева, о чем говорилось в предыдущих главах.

Частотная зависимость эффекта ИМ ЭМИ на фоне повышенной температуры. В природных условиях, а также в условиях населенных пунктов организмы могут быть подвержены действию электромагнитного излучения (модулированного или немодулированного) на фоне повышенной температуры. Поэтому возникает вопрос о сочетанном влиянии этих факторов. Кроме того, одновременное участие двух возможных механизмов, теплового и нетеплового, в формировании эффекта ставит вопрос о сочетанном действии двух этих факторов, об их вкладе в конечный результат влияния. В настоящее время известно, что эффект сочетанного (комбинированного) действия факторов на биосистемы может иметь ряд вариантов реализации. В случае двухфакторного влияния возможен антагонизм их действия, аддитивность и усиление действия (Ярмоненко С.П., 1984; Кузин А.М., 1991). В последнем случае влияние реализуется либо по схеме сенсбилизации, когда один фактор повышает чувствительность объекта к действию другого, либо синергизма, когда величина эффекта совместного влияния больше суммы эффектов влияния по отдельности.

В прошедший период времени, начиная с 60-х годов 20 века, в России был проведен целый комплекс исследований, посвящённый комбинированному влиянию ЭМИ и других факторов окружающей среды. Первые работы в этом направлении выполнены А.С. Пресманом (1964) и посвящены комбинированному влиянию ионизирующего и неионизирующего излучения на животных. Предварительное облучение животных ЭМИ нетепловых интенсивностей снижает поражающее действие ионизирующего излучения. Опубликованы исследования, в которых сочетанное с ионизирующим излучением действие ЭМИ усиливает результат лучевого поражения организмов. Ю.А. Холодовым продемонстрировано, что у обезьян, предварительно подвергшихся воздействию ионизирующим излучением,

оказалась повышенная чувствительность к ЭМИ и постоянному магнитному полю. Электромагнитное воздействие вызывало появление в их мозге эпилептической активности. Исследовались реакции на сочетанное влияние ЭМИ с другими факторами (инфразвук, ультрафиолетовое облучение, физические перегрузки, гипер- и гипоксия, аллергены, фармакологические препараты). Практически всегда, реакция на сочетанное (комбинированное) действие ЭМИ отличалась от эффектов изолированного влияния.

Необходимо знать и иметь возможность прогнозировать эффекты электромагнитных излучений на фоне других экологически значимых факторов.

Проведены эксперименты оценочного характера (М.А. Большаков с соавт., 2002), в которых воздействие ЭМИ (немодулированного и импульсно модулированного) на эмбрионы дрозофил осуществлялось на фоне повышенной температуры (40°C). Эмбрионы возраста 15 часов 10 минут облучались при частотах модуляции 6 и 22 Гц, когда реализовывался эффект за счет предположительно теплового механизма влияния и при 10 и 16 Гц, когда могло проявляться нетепловое влияние. Предполагалось, что а) сочетанное влияние немодулированного ЭМИ не должно значительно увеличивать ППР относительно величины, полученной после аналогичного облучения при нормальной температуре; б) при частотах модуляции 2.5, 6, 22 и 40 Гц на фоне повышенной температуры эффект так же не должен существенно отличаться от эффекта при нормальной температуре; в) при частотах модуляции 10 и 16 Гц в результате сочетанного действия ИМ ЭМИ и нагрева величина ППР должна увеличиться за счёт увеличения вклада теплового механизма влияния в формирование конечного эффекта при сохранении неизменной величины вклада не теплового механизма.

Проведенные эксперименты показали, что результаты воздействия ЭМИ на эмбрионы дрозофил на фоне повышенной температуры могут отличаться от эффектов ЭМИ при нормальной температуре. Сочетанное действие немодулированного ЭМИ с УПМ 6 Вт/кг и нагрева до 40°C приводило к очень незначительному увеличению ППР. Поэтому эффект оказался статистически не значимым по сравнению с эффектом при нормальной температуре 24,5°C ($3,8 \pm 1,1\%$ в условиях нагрева против $3,2 \pm 0,7\%$, при нормальной температуре; эффект воздействия одной повышенной температурой 40°C на тест эмбрионов составил $1,3 \pm 0,7\%$). Результаты исследования влияния ИМ ЭМИ представлены на рис.30.

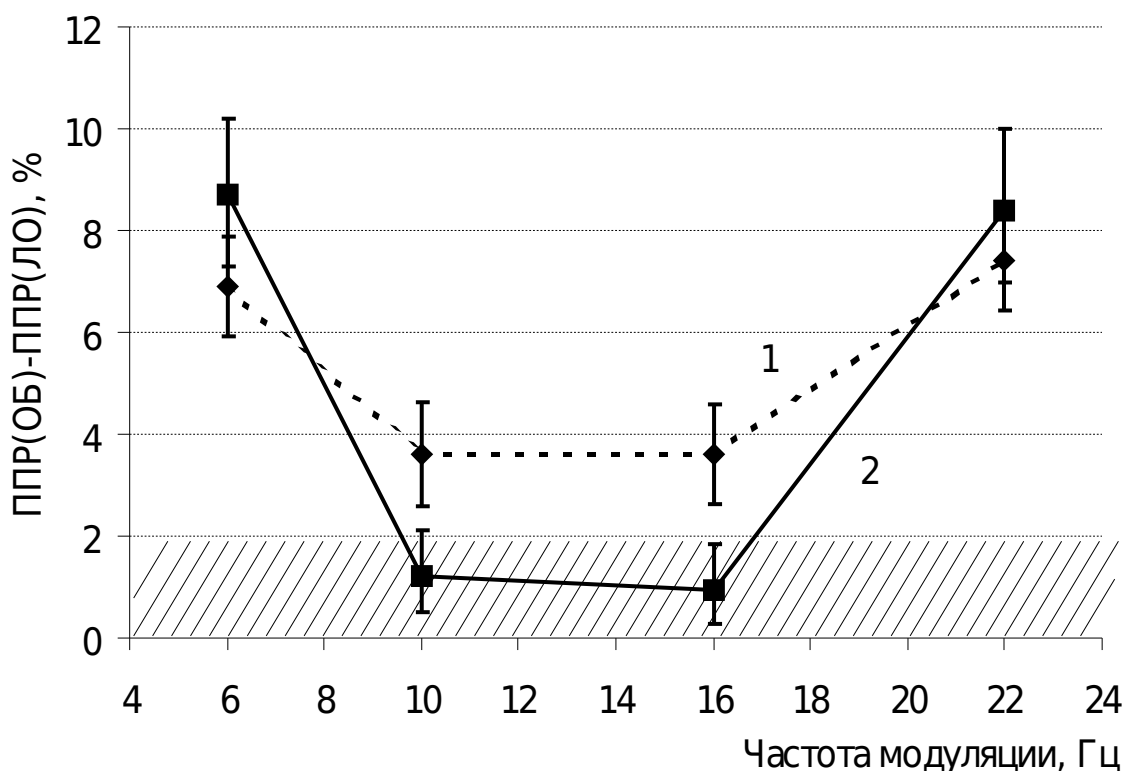


Рис. 30. Эффект действия модулированного ЭМИ 460 МГц, нормированного относительно эффекта в контрольной группе, на фоне: 1. нормальной температуры; 2. повышенной температуры 40°C, при разных частотах модуляции. Штриховкой обозначен уровень эффекта в контрольной группе.

Необходимо отметить, что эффект существенно зависит от частоты модуляции. ИМ ЭМИ с частотами модуляции 6 и 22 Гц на фоне нагрева увеличивало ППР приблизительно на 1 - 2% по сравнению с ППР при нормальной температуре. Напротив, при частотах модуляции 10 и 16 Гц облучение при повышенной температуре инициировало очень малый ППР. Таким образом, эффекты нагрева и ИМ ЭМИ с частотами модуляции 6 и 22 Гц аддитивны и их сочетанное действие приводит к увеличению ППР. При частотах 10 и 16 Гц сочетанное влияние результируется уменьшением ППР, что явно указывает на неаддитивный характер влияния.

Влияние модулированного ЭМИ на соотношение полов вылетевших имаго. Известно, что некоторые физико-химические факторы могут инициировать неодинаковый для разных полов биологические эффекты. В настоящей работе на дрозофиле показано, что некоторые дефекты развития, инициированные ЭМИ, зависят от пола имаго. Что проявлялось, в частности, в редукции полового аппарата только у самцов дрозофил после воздействия ЭМИ на эмбрионы. Не исключено поэтому, что самцы и самки в эмбриональном периоде развития по-разному реагируют на воздействие ЭМИ. Сказывается на соотношении полов и влияет на динамику численности популяции. Показано, что после сочетанного воздействия ИМ ЭМИ и температуры на эмбрионы дрозофил возраста 15 часов 10 минут, соотношение полов у вылетевших имаго не соответствует соотношению полов в контрольной группе (Табл.9). Из анализа представленных в таблице данных следует, что из облучённых эмбрионов вне зависимости от частоты модуляции самок вылетело больше, чем самцов.

Таблица 9. Влияние ИМ ЭМИ на фоне повышенной температуры 40°C на соотношение полов вылетевших имаго (exp – экспериментальная группа, sham – группа «ложного облучения», con – контрольная группа).

Пол	Соотношение полов после облучения модулированным ЭМИ на фоне повышенной температуры, при разных частотах модуляции			
	6 Гц	10 Гц	16 Гц	22 Гц

	exp	sham	con	exp	sham	con	exp	sham	con	exp	sham	con
Самцы	45	48,3	49,1	43,4	50,5	50,5	43,1	50,7	47,8	43,6	47,8	49,9
Самки	54,9	51,7	50,9	56,6	49,5	49,5	56,9	49,3	52,1	56,4	52,2	50,1

Возникающий дисбаланс полов определяется, по-видимому, только за счёт теплового влияния ИМ ЭМИ, скорее всего, локального нагрева, так как не обнаружена частотная зависимость, в возникновении которой может участвовать нетепловой механизм влияния ЭМП. Половой дисбаланс объясняется большей жизнеспособностью самок по сравнению с самцами. Необходимо учитывать результаты исследований в экологических прогнозах, чтобы избежать нежелательных экологических ситуаций в зонах воздействия ЭМИ.

Таким образом, эффект влияния ИМ ЭМИ на эмбриональное развитие дрозофил, оцениваемый по процентам прерванного развития (ППР), имеет частотную зависимость. В формировании ППР участвуют альтернативные механизмы влияния ИМ ЭМИ: тепловые, за счет локальных повышений температуры в эмбрионе, и нетепловые. Повышенная температура усиливает контраст влияния теплового и нетеплового механизма на ППР. За изменениями соотношений полов вылетевших имаго дрозофил, по-видимому, ответственен только тепловой механизм влияния. Установлено, что нарушение развития наблюдалось у лабораторных животных (кроликов, крыс, мышей) после продолжительного или многократного воздействия ЭМИ с ППЭ от единиц мВт/см² и более. Повышалось число случаев эмбриональной гибели, аномалий развития внутренних органов, снижение массы плода, уродств. Наиболее характерными типами уродств (тератизма) являлись нарушения формы конечностей и хвоста животных.

Как полагают, организм человека, особенно на ранних стадиях развития зародыша, соответствующим периодам имплантации и раннего органогенеза, может быть чувствителен к действию ЭМП радиочастотного диапазона, особенно если уровень облучения выше 10 мВт/см². Именно по

этой причине беременным женщинам не рекомендуется пользоваться сотовыми телефонами и запрещены физиопроцедуры УВЧ и ДМВ терапии.

Контрольные вопросы.

1. Что такое тератогенное влияние и может ли ЭМИ РЧ влиять на развивающийся организм?
2. Как ЭМИ РЧ влияет на морфогенез дрозофил?
3. Какие периоды в эмбриональном развитии дрозофил наиболее чувствительны к электромагнитному облучению?
4. Какой природы механизмы влияния ЭМП: тепловой или нетепловой, оказывают влияние на развитие эмбрионов дрозофил?
5. Как зависит повреждающее действие ЭМИ на развитие дрозофил от частоты модуляции?
6. Как реализуется сочетанное с повышенной температурой влияние ИМ ЭМИ?
7. Как воздействие ЭМИ влияет на соотношение полов имаго дрозофилы?
8. Какие экологические последствия возможны в результате электромагнитного облучения развивающихся организмов?

БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ЭМИ КВЧ (миллиметровые ДЛИНЫ ВОЛН)

ЭМИ КВЧ-диапазона распространяются в пределах прямой видимости и поэтому поглощаются первыми же биологическими объектами, встретившимися по ходу распространения. ЭМИ КВЧ обладает явно выраженным биологическим действием. Помимо обычного теплового, или как ещё его называют, энергетического

воздействия, ЭМИ КВЧ вызывают биологический эффект при немодулированном воздействии на организм излучением с низким уровнем интенсивности (менее 1 мВт/см^2), что не приводит к измеряемому нагреву (менее $0,1$ градуса). В этом случае иногда говорят об информационном, управляющем действии ЭМИ КВЧ. Благодаря ряду особенностей взаимодействия миллиметровых волн с различными биообъектами, использование их в биологии и, в особенности, медицине является уникальным. Ведущую роль в изучении биологического действия играли исследования, проводимые школой академика Н.Д. Девяткова. Изложенный ниже материал базируется на публикациях, выполненных сотрудниками данной школы (Н.Д. Девятков, О.В. Бецкий, М.Б. Голант, 1986; О.В. Бецкий, М.Б. Голант, Н.Д. Девятков, 1988; О.В. Бецкий, Н.Н. Лебедева, 2002).

Идея о возможности специфического воздействия ЭМИ КВЧ на биологические структуры и организмы была высказана советскими учёными академиком Н.Д. Девятковым и профессором М.Б. Голантом в 1964-1965 годах. Миллиметровое излучение космического происхождения сильно поглощается атмосферой Земли. По этой причине живые организмы не могли иметь эволюционно отобранных, естественных механизмов приспособления к колебаниям заметной интенсивности в этом диапазоне излучений, но могли приспособиться к собственным аналогичным колебаниям..

Одним из первых механизмов генерации колебаний внутри организма был предложен английским физиком Г. Фрелихом. Биологические структуры могут иметь колебания диполей (поляризованных молекул) в диапазоне частот от 100 до 1000 ГГц (длины волн от 3 до 0,3 мм). Различные метаболические процессы в клетках обеспечивают энергией локально возбуждённые дипольные колебания, в результате чего происходит своеобразная «биологическая накачка». За счёт нелинейных эффектов взаимодействия дипольных

колебаний и нелинейной связи этих колебаний с упругими колебаниями внутри молекул возможен переход всей молекулярной системы в метастабильное состояние, при котором энергия трансформируется в энергию колебаний одной частоты. Под влиянием внешнего излучения метастабильное состояние может переходить в основное и в результате чего образуется «гигантский диполь». Он будет отображать частный случай когерентного состояния биологического объекта. Такая модель предполагает, что описанные колебания охватывают большие участки биологических мембран или биомакромолекул, в результате чего формируется биологический эффект. Есть и другие модели, объясняющие возможность перехода в возбуждённое когерентное состояние (модель «белок-машина»). В реализации указанных состояний важную роль играет вода как поглотитель электромагнитной энергии. Например, слой воды толщиной 1 мм при длине волны излучения 8 мм ослабляет излучение в 100 раз, а при длине волны 2 мм – в 10000 раз. Поэтому биологическое действие мм-излучений поверхностное. При воздействии на кожу человека ЭМИ КВЧ практически вся энергия излучения поглощается в приповерхностных слоях толщиной несколько десятых миллиметра, где весовое содержание воды достигает 65%.

Экспериментальные исследования биологической эффективности ЭМИ КВЧ были проведены на молекулярном, мембранном, клеточном и организменном уровнях. Первые опыты были проведены в 1965 году на микроорганизмах, и уже тогда были выявлены необычные свойства взаимодействия миллиметрового излучения низкой интенсивности с биообъектами. Прежде всего отметили, что воздействие носит нетепловой, не энергетический характер, т.е. регистрируемый эффект не связан с существенным нагревом объекта или его разрушением.

- взаимодействие излучения с объектом носит чаще всего частотно-зависимый характер. Частотная зависимость эффекта напоминает по форме резонансную характеристику колебательного

контура. По аналогии с этим обычно говорят о резонансном характере взаимодействия мм-волн с биообъектами. Например, исследования, проведенные в НИЯФЭ при Томском политехническом университете, показали, что в диапазоне частот излучения 40 – 50 ГГц обнаруживается более 10 частот, на которых происходит резонансное взаимодействие излучения с молекулой гемоглобина в крови. В другом эксперименте исследовалось влияние миллиметрового излучения на кишечную палочку. В качестве тест-реакции использовали индукцию белка колицина, который убивает кишечную палочку. Как оказалось, процент клеток, индуцировавших колицин в результате воздействия, при разных частотах был разным. Максимум эффекта (увеличение колицининдуцирующих клеток в 2 – 3 раза) наблюдался для излучений с длинами волн 6,5; 6,53 и 6,55 мм. Плотность потока энергии составляла 5 мкВт/см², оптимальное время облучения 2 – 3 часа. Результаты демонстрировали именно квазирезонансный характер влияния, при котором резонансные частоты разнесены на 120 – 200 МГц. Ширина полосы частот, эффективно влияющих на процессы, составляла $10^{-3} - 10^{-4}$ от средней частоты;

- биологический эффект проявлялся при некоторой минимальной интенсивности облучения (индукция колицина начинается при воздействиях с ППЭ выше 1 мкВт/см²). Вообще, пороговая ППЭ может для разных объектов варьировать в широких пределах от мкВт/см² до мВт/см², причём при облучении микроорганизмов мощность меньше, а животных – больше;

- эффект по величине не менялся при изменении интенсивности облучения в достаточно широких пределах (эффект индукции колицина по величине не меняется в пределах ППЭ от 10 мкВт/см² до 1 мВт/см² и выше);

- биологический эффект наступал спустя некоторое время после начала облучения. Оптимальное время облучения достаточно велико,

для разных объектов оно варьирует от 15 – 20 минут до 1 – 2 часов, затем, как правило, эффект стабилизируется по величине;

- эффект последствия (остаточный, сохраняющийся после прекращения облучения) имел место только после продолжительного воздействия от нескольких десятков минут до нескольких часов;

- биологический эффект носил кумулятивный характер, т.е. повторные или многократные воздействия увеличивали степень влияния. Иногда воздействие обнаруживалось после нескольких сеансов воздействия. Для микроорганизмов иногда требовалось облучение нескольких поколений клеток, чтобы обнаружить влияние;

- эффект облучения зависит от исходного функционального состояния облучаемых организмов.

Вышеприведенные закономерности прослежены не только на бактериальных клетках, но и на дрожжевых клетках, на мышцах и других лабораторных животных. В частности, воздействие ЭМИ с длиной волны 7,1 мм при ППЭ 10 мВт/см² на поверхность кожи мышей защищало костный мозг и кроветворную функцию от повреждающего действия рентгеновского излучения. Полученные закономерности позволили начиная со второй половины 70-х годов 20 века использовать КВЧ-излучение в лечебных целях. В качестве биологически значимых (терапевтических) частот использовались частоты: 53,57 ГГц (длина волны 5,6 мм) и 42,25 ГГц (длина волны 7,1 мм). Разработаны специальные терапевтические генераторы КВЧ этих частот, которые под разными марками, например: «Явь-1», «Ярмарка», «Ялбот» и др. выпускаются промышленностью и используются в лечебной практике.

Помимо резонансных эффектов ЭМИ КВЧ может инициировать и нерезонансные, т.е. не зависящие от несущей частоты излучения. Нерезонансные эффекты имеют тепловой механизм формирования и возникают во всех случаях, когда в облучаемой с достаточной интенсивностью среде присутствуют молекулы воды, наиболее сильно

поглощающие миллиметровое излучение. Формирование эффектов связано с микронагревом приповерхностных слоёв, где происходит основное поглощение энергии излучения, и появлением конвективного движения жидкости, которое может оказывать влияние на мембранные процессы. В частности, может изменяться пассивный перенос ионов через мембраны, изменяться и активный транспорт ионов (эффект наблюдался на коже лягушки). По мнению авторов гипотезы (Н.Д. Девятков, М.Б. Голант, О.В. Бецкий), наблюдаемые закономерности действия монохроматических ЭМИ мм-диапазона волн нетепловой интенсивности объясняются тем, что при проникновении в организм эти излучения на определённых, резонансных частотах играют роль сигналов-носителей информации. Такие сигналы осуществляют управление и регулирование активности биологических функций, характерных для каждого конкретного организма. Если в результате каких-либо повреждений или развития патологического процесса такая регуляция нарушается, то её можно восстановить, подействовав мм-излучением с соответствующей резонансной частотой. Гипотеза имеет ценность исключительно в медицинском плане. Тем не менее, не исключено, что она будет востребована и для задач электромагнитной экологии.

Контрольные вопросы

1. Влияют ли ЭМИ КВЧ на биосистемы?
2. Какой механизм генерации внутренних колебаний?
3. В чём проявляется резонансный характер воздействия ЭМИ КВЧ на биообъекты?
4. Какие закономерности присущи биологическим эффектам миллиметровых волн?
5. Что представляет нерезонансная схема действия ЭМИ КВЧ?

МЕХАНИЗМЫ БИОЛОГИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭМИ.

Концепция теплового и нетеплового влияния ЭМИ. **Существование биологически значимых реакций на воздействие ЭМИ в ряде случаев не имеет очевидного объяснения. Экспериментально обнаруженные эффекты ЭМИ, наблюдавшиеся на клеточном уровне при различных длительностях и интенсивностях воздействия, при низких уровнях УПМ, модулированные, импульсные стимулировали разработку модельных представлений биологических механизмов влияния ЭМП.**

В практике изучения механизмов биологического действия ЭМИ акцентируется внимание на установлении, идентификации физической причины, вызвавшей изучаемый эффект или реакцию, например, эффект тепловой (термогенный) или нетепловой (нетермогенный) природы.

Как уже указывалось, при описании физических характеристик радиочастотных ЭМИ, поглощение объектом энергии излучения сопровождается её преобразованием в тепловую.

Физико-химической основой влияния температуры является изменение скорости протекания химических реакций в организмах. Зависимость химической реакции от температуры описывается интегральным уравнением Аррениуса,

$$k = A \exp(-E_a / RT) ,$$

где k - константа скорости реакции; A – предэкспоненциальный множитель, характеризующий частоты столкновения реагирующих молекул и вероятность требуемой для реакции ориентации сталкивающихся молекул; E_a- энергия активации реакции; R- универсальная газовая постоянная; T - абсолютная температура, при которой реализуется химическое превращение. Как оказалось, реакции живых систем на температурные воздействия более сложны и зависят не только от величины изменения температуры, но и от скорости её изменения. В частности, Д. Карпентер показал, что существует

зависимость изменения электрической активности нервных клеток от скорости их нагрева. Температурный фактор оказывает влияние и на другие жизненно важные процессы, как например, на индивидуальное развитие. В частности, у насекомых, действие пониженной или повышенной температуры на индивидуальное развитие связывают с влиянием, оказываемым данным фактором на развёртывание генетических программ. Зарубежными исследователями (F.A. Ritossa, 1962; M.Ashburner, 1979,) была показано возможность регуляции экспрессии генома с помощью кратковременного теплового воздействия. Таким образом, даже кратковременное воздействие повышенной температуры способно вызвать синтез белков теплового шока и одновременное блокирование синтеза других белков.

Одним из фундаментальных проявлений взаимодействий высокочастотных ЭМИ с водосодержащими средами является поглощение энергии поля, сопровождаемое выделением тепла. При этом рост температуры объекта, облучаемого полем, вполне может определять характер изменения его функционирования. При действии ЭМИ, оказывающим явно тепловое действие, степень нагрева может быть измерена или достаточно точно рассчитана на основе интенсивности облучающего поля и электрических характеристик объекта. Дозиметрическая оценка ЭМИ и ясное представление о природе тепловыделения в ходе облучения делают привлекательной идею о тепловой природе механизмов биологического действия радиочастотных ЭМИ. В подобных случаях эффект электромагнитного воздействия легко прогнозируем, особенно если известны закономерности реагирования биообъекта на повышение температуры.

Определение теплового влияния базируется на физиологических возможностях облучаемых биологических объектов. Считается, что если энергия электромагнитного излучения меньше «теплого порога» (10 мВт/см² для человека), то воздействие нетепловое, а если больше – то тепловое. Величина указанного порога рассчитывалась исходя из

особенностей терморегуляции организма человека. Колебания уровня тепловыделения, обусловленного процессами метаболизма, с которыми эффективно справляется система терморегуляции организма человека, достигают 200 Вт (~100 Вт – покой, ~ 300 Вт – умеренная физическая нагрузка). Площадь поперечного сечения человека в зависимости от направления наблюдения изменяется в пределах 0,1 - 0,7 м² со средней величиной порядка 0,4 м². В первом приближении, справедливом для волны излучения, гораздо меньше линейных размеров объекта, половина энергии этого излучения, подающая на человека, поглощается в его тканях, переходя в тепло. Если принять за безопасный уровень интегрального дополнительного тепловыделения величину порядка 20 Вт, что гораздо меньше, чем упомянутая величина колебаний собственной теплопродукции, то плотность потока энергии излучения, которая будет приводить к такому дополнительному вводу тепла, как раз составит величину порядка 100 Вт/м² = 10 мВт/см² (В.В.Тяжелов с соавт., 1983). При воздействии ЭМИ 1000 МГц порог для человека определен в пределах 5 - 11 мВт/см², для обезьян и кошек - 2,5 - 5 мВт/см², для крыс и мышей - 0,5 - 1 мВт/см². Кроме этого, эффект влияния ЭМИ может быть результатом специфического теплового воздействия за счёт микролокальных нагревов. В подобных случаях интегральный нагрев объекта не превышает доли градуса, но эффект эквивалентен перегреву на единицы градусов.

Большое число исследователей (Холодов Ю.А., 1975; Эйди У.Р., 1980; Adey W.R. et al, 1981; Frey А.Н., 1968, 1983, 1985; Давыдов Б.И. с соавт., 1984; Григорьев Ю.Г. с соавт., 1998, 1999, 2000; O.V. Betskii & N.N. Lebedeva) считают, что помимо теплового биологического действия, существуют нетепловое влияние. Такая позиция обусловлена убедительными данными о воздействиях излучений, не сопровождающихся измеряемым нагревом, но тем не менее способных инициировать значительные физиологические изменения, что трудно объяснить только повышением температуры. Под действием низкоинтенсивного ЭМИ изменяется условно-

рефлекторная деятельность и поведение животных, изменяется электрическая активность мозга и нейронов, происходят и другие функциональные изменения. По данным А. Фрая (1985), радиочастотное ЭМИ нетепловой интенсивности оказывают влияние на ритмику сокращения препарата изолированного сердца лягушки при облучении с импульсами, синхронизированными с R-зубцом электрокардиограммы. Наблюдаемые сдвиги ритмичности противоположны по направленности сдвигам в функционировании сердца, наблюдаемым при нагреве объекта (Р.Э. Тигранян, 1982).

Особенности биологического действия модулированных ЭМИ в сравнении с немодулированными. На важную роль модуляции в формировании эффектов биологического действия радиочастотного ЭМИ, вероятно, впервые обратил внимание Аллан Фрай при исследовании так называемого "радарного" эффекта (А.Н. Frey, 1962, 1971). Феномен заключался в том, что при действии импульсно модулированного ЭМИ с несущей частотой около 1 ГГц и средней ППМ в десятки мкВт/см² на голову человека, последний воспринимает это воздействие в виде звукового сигнала. Эффект был назван "радиозвук" и активно изучался в США и СССР. Оказалось, что характер восприятия "радиозвука" во многом определяется параметрами модуляции. В качестве объяснения "радиозвука" широкое распространение получила "термоэластическая" модель Джеймса Лина, в соответствии с которой под влиянием микроволновых импульсов с определёнными амплитудно-частотными характеристиками имеет место резонансно подобное преобразование электромагнитной энергии в механические колебания черепа, которые передаются во внутреннее ухо и формируют там ощущение звука, по тональности соответствующего частоте следования микроволновых импульсов (J.C. Lin, 1980).

К настоящему времени многие исследователи (У.Р.Эйди, 1980; Ю.Г. Григорьев Ю.Г., 1999) убеждены в том, что важную роль некоторых форм модуляции в формировании биоэффектов электромагнитных излучений

играют некоторые виды модуляции. Показано наличие так называемых частотных и амплитудных "окон", воздействия в пределах которых характеризуется высокой биологической активностью, и проявляются на клеточном уровне и на уровне физиологических систем (центральной нервной, сердечно-сосудистой, иммунной). В некоторых работах указывается на «информационный» характер биологического действия модулированных микроволн, обусловленный именно наличием модулирующего сигнала.

Широкое признание получили результаты исследований американского нейрофизиолога Эйди по биологическому действию модулированных низкими частотами радиоизлучений (У.Р. Эйди, 1980; W.R. Adey, 1981, 1993). Его классические эксперименты проведены на изолированном головном мозге цыпленка и кошки. В работе исследовалось связывание Ca^{2+} мембраной клеток мозга после воздействия модулированных низкими частотами электрических и электромагнитных полей. Эффект определялся по выходу ионов кальция в межклеточное пространство путём сравнения радиоактивности опытного и контрольного образцов. Электрические поля напряженностью 5В/м не вызывали эффекта, величина являлась подпороговой. Поля напряженностью 10 и 50 В/м статистически значимо уменьшали выход кальция в раствор, но только при частоте 6 или 16 Гц. При напряженности поля 100 В/м эффект вновь отсутствовал. Кроме того, электрические поля более низкой или высокой частоты (1 Гц или 32 Гц) при оптимальной напряженности эффекта не вызывали. После облучения мозга цыплят радиочастотным излучением 147 МГц, модулированным низкими частотами, наблюдался эффект противоположного знака, увеличение выхода кальция в раствор. В этих экспериментах максимальный эффект был достигнут после воздействия ЭМИ, модулированного частотами в диапазоне 9-16 Гц. Наличие так называемых «частотных и амплитудных окон», воздействия в пределах которых характеризуется высокой биологической

активностью продемонстрировано также на уровне ряда физиологических систем: центральной нервной, сердечнососудистой и иммунной.

В экспериментах на кроликах показано, что изменение импульсации нейронов, изменение ЭЭГ и поведения животных в условиях "открытого поля" регистрировались только при импульсно-модулированном режиме воздействия ЭМИ 1,5 ГГц с ППЭ 300 мкВ/см² и отсутствовали в условиях не модулированного воздействия.. Исследование показало, что 5-минутное облучение 16-суточных куриных эмбрионов ЭМИ 10 ГГц с плотностью потока энергии 40 мкВт/см², импульсно модулированного частотами 1, 2, 3, 7, 9, и 10 Гц, оказывает более сильное влияние по сравнению с не модулированным воздействием той же интенсивности. Эффект ИМ ЭМИ наиболее значимо проявлялся в реакциях импринтинга после воздействия с частотами 9 и 10 Гц. В частности, оказалось, что импульсно-модулированное ЭМИ более эффективно влияет на электрическую активность нервных клеток по сравнению с немодулированными ЭМИ при одинаковой средней удельной поглощенной мощности.

К настоящему времени существует большое количество фактов, подтверждающих безусловную роль модуляции ЭМИ в формировании биологических эффектов. «Энергетические» и «частотные» окна обнаружены при воздействии на всех уровнях организации организма, при низкой плотности потока энергии, что позволяет предполагать нетепловой механизм биологического действия модулированных ЭМИ.

Механизм теплового влияния. Как уже отмечалось выше, механизмы влияния ЭМИ на биологические объекты принято подразделять на тепловые и нетепловые. Тепловое влияние обусловлено повышением температуры в облучаемом биологическом объекте или его части в результате преобразования части или всей поглощённой энергии электромагнитного излучения в тепловую. Такое преобразование обусловлено тем, что

электромагнитная волна оказывает влияние на ионы тканей объекта, инициируя переменный ток проводимости, а так же воздействует на дипольные молекулы и, периодически их переориентируя, индуцирует токи смещения (Х.П. Шван, 1967; Б.И. Давыдов с соавт, 1984). Соотношение между токами проводимости и токами смещения характеризуется величиной $\operatorname{tg} \delta$ (тангенс угла потерь). Поток ионов, определяющий ток проводимости, возникает под действием микроволнового электрического поля. В результате столкновений, которые происходят тысячи раз в течение каждого цикла микроволнового электрического поля, происходит преобразование приобретенной, упорядоченной энергии носителей в беспорядочную кинетическую энергию. Под действием электрического поля дипольные молекулы воды, стремятся расположиться по направлению поля. Ориентация приводит к упорядочиванию системы и накоплению энергии. По прекращению действия электрического поля диполи принимают беспорядочную ориентацию и этот процесс сопровождается выделением тепла.

Повышенная температура изменяет скорость протекания как физических (диффузия, конвекция), так и биохимических процессов в клетках, органах и тканях в соответствие с температурными коэффициентами. Биологические эффекты подобного рода легко моделируются с помощью обычного нагрева и достаточно надёжно прогнозируются. Знание механизмов подобного влияния позволяет использовать источники ЭМИ в ДМВ-терапии для глубинного прогревания тканей и органов.

Микролокальные перегревы в гетерогенных биологических структурах. Тепло, индуцируемое радиочастотным излучением, неравномерно распределяется в объекте в зависимости от длины волны и диэлектрических параметров внутренней структуры организма. В связи с неоднородностью различных частей биологического объекта, в участках с разной диэлектрической проницаемостью возникают так называемые

локальные перегревы, когда средняя температура объекта повышается незначительно, а в локальном объеме может достигать больших величин

Гипотеза локального нагрева рассматривает сложный характер биологического эффекта.

1 нагрев электролита в поре канала и увеличение подвижности ионов должно увеличивать проводимость канала;

2 с нагревом поры проводимость канала будет изменяться за счёт статистического перераспределения реализуемых уровней проводимости;

3 должно изменяться среднее статистическое время жизни каждого канала;

4 должна изменяться частота возникновения канала и это должно зависеть от температуры липидов мембраны.

Как было показано для воздействие ЭМИ действительно увеличивает проводимость одиночного канала пропорционально интенсивности воздействия (С.И. Алексеев с соавт., 1978). Поэтому быстрая фаза развития эффекта, увеличение проводимости, обусловлена именно относительным увеличением отдельных проводимостей всей совокупности одиночных каналов. Теоретическая оценка локальных полей, которая была сделана Тяжеловым с соавт.(1978,б), показала, что в системе «ячейка с электролитом – БЛМ на отверстии стаканчика, погружённого в электролит», локальное поле в канале, образованном модифицирующим агентом, при перпендикулярной ориентации БЛМ относительно E-вектора поля может на полтора порядка превышать величину поля в электролите ячейки. Соответственно, выделяемая в канале теплота будет на 3 порядка больше, чем в окружаемом пространстве. В случае ориентации БЛМ параллельно вектору электрической напряжённости облучающего поля большее тепловыделение будет в примембранных слоях электролита и именно это будет определять эффект с медленной кинетикой. Концентрации полей в

отверстиях перегородок с малой по модулю диэлектрической проницаемостью относительно таковой для окружающей среды показал, что с уменьшением частоты концентрация УПМ в области отверстия возрастает, и при частоте 0,1 ГГц может превышать на 3 - 4 порядка среднее значение УПМ в окружающей среде. Дальнейшее уменьшение частоты должно приводить к еще большему росту концентрации поля. Если отверстие очень маленькое, то область существенных значений концентрации поля четко локализована самим отверстием (Рис.31). Это означает, что эффект в пределах области локального нагрева будет существенно больше, чем можно ожидать на основе оценки интегральной УПМ.

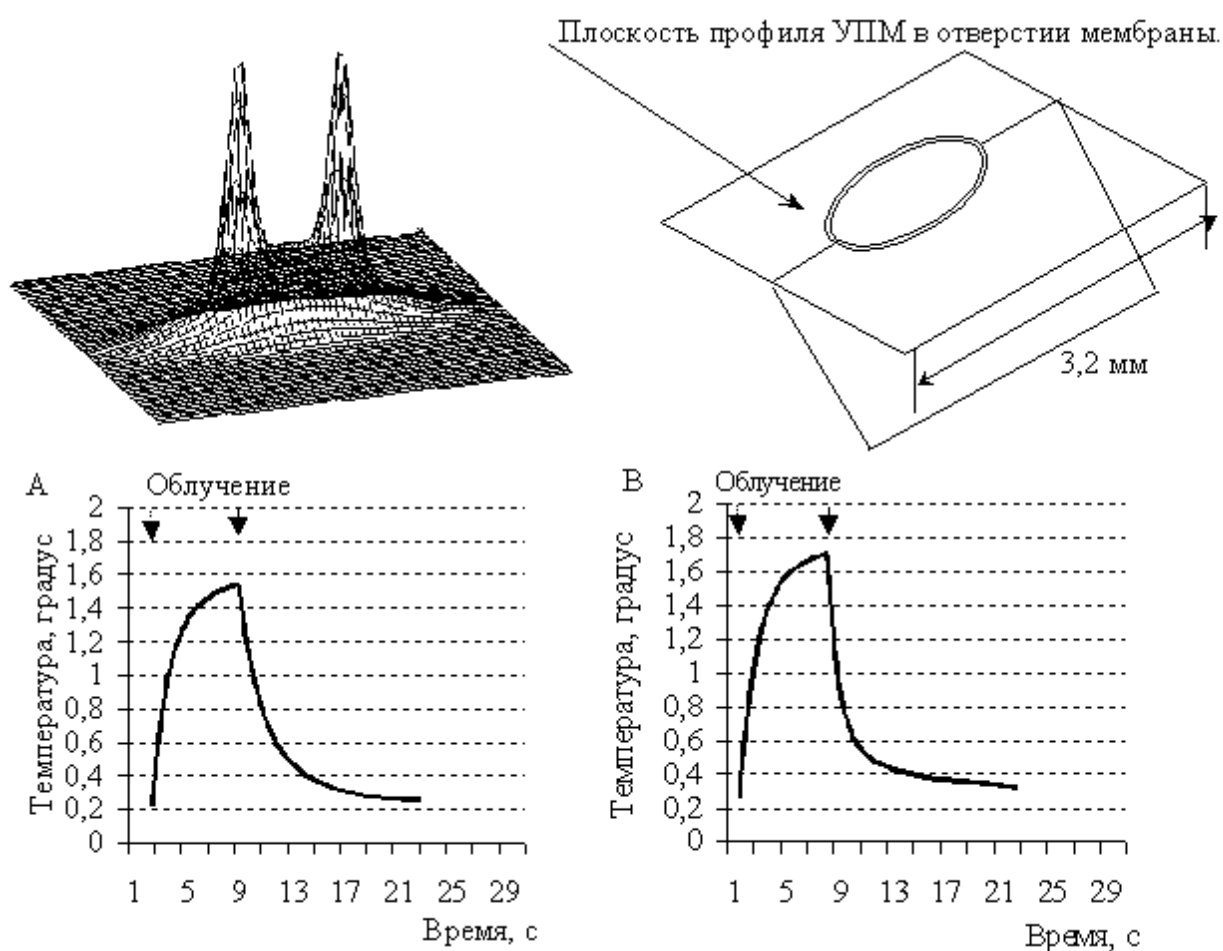


Рисунок 31. Значения концентрации УПМ на верхнем рисунке в плоскости, перпендикулярной перегородке и проходящей через центр отверстия в мембране ($D/H = 9$) и динамика температуры в отверстии БЛМ ($D/H = 1$) (нижний рисунок). Время экспозиции 8 сек. А- край отверстия, В- центр отверстия. (В.В. Тяжелов с соавт., 1983).

Роль биологических мембран в формировании нетепловых эффектов радиочастотных ЭМИ. В первой половине 70-х годов в ряде работ, ориентированных на изучение первичных механизмов биологического действия ЭМИ, было установлено, что в формировании эффектов и реакций на воздействие существенную роль играют биологические мембраны. Исмаилов (1971) получил данные, указывающие на влияние СВЧ-излучения 1009 МГц с ППМ 45 мВт/см² на проницаемость мембраны эритроцитов человека для ионов натрия и калия. Используя электрофизиологические методики, получены результаты, указывающих на участие мембран в биологическом действии ЭМИ. Из совокупности имеющихся литературных данных, несмотря на их известную противоречивость, следовало, что одной из основных реакций клеточного уровня при воздействии ЭМИ является изменение проницаемости мембран для ионов. Существует целый ряд представлений относительно того, как радиочастотные ЭМИ могут оказывать биологическое влияние нетеплового характера. Интересным вариантом механизма подобного рода является гипотеза мембранного детектирования ("выпрямления"), которая рассматривает возможность влияния радиочастотных излучений на функционирование клеток, прежде всего возбудимых, за счёт дополнительной разности потенциалов, возникающей в результате детектирования огибающей ЭМИ. Проведено измерение величины прироста мембранного потенциала в нейронах аплизии со средним диаметром 0,4 мм и показано, что при облучении ЭМИ 450 МГц с ППМ 5 мВт/см² мембранный потенциал увеличивается на 40 мкВ (A.R. Sheppard et al., 1981). Что меньше тех изменений мембранного потенциала, которые могут быть физиологически значимым с точки зрения процессов возбуждения. Следовательно, механизм мембранного детектирования, обеспечивающий изменение мембранного потенциала клеток при воздействии радиочастотного ЭМИ, нетепловой по своей природе, не может значимо изменить функционирование клеток.

Для обеспечения возможности формирования эффектов слабых воздействий на клетки необходимы усилительные механизмы. По мнению Эйди (1980, 1981), они могут быть реализованы с помощью неравновесных триггерных процессов с дальним резонансным взаимодействием молекул. Применительно к радиочастотному диапазону электромагнитного излучения местом восприятия слабого внешнего воздействия может быть полианионный белковый слой на поверхности клеточных мембран, с которым связываются Ca^{2+} . Кооперативная динамика связывания кальция поверхностью возбудимых мембран определяет существование предельного цикла молекулярного поведения и белок-кальциевое взаимодействие будет колебаться с фиксированной частотой и амплитудой. Небольшое изменение за счёт слабого внешнего воздействия может легко разрушить существовавшее динамическое равновесие (степень связывания кальция). Прямого экспериментального измерения, показывающего существование динамического белок-кальциевого равновесия с характерными частотными свойствами нет. Красивая и элегантная гипотеза Эйди требует дальнейшей верификации и, возможно, модификации, поскольку помимо "окон" по частоте воздействия и интенсивности обнаружено "окно" по длительности облучения (С.V. Byus, R.L. Lundak, R.M. Fletcher, W.R. Adey, 1984). Для объяснения ряда нейрофизиологических эффектов нетепловой природы Алан Фрай (1983) предложил "дофаминовую" гипотезу, согласно которой пусковой механизм формирования нейрофизиологических эффектов низкоинтенсивных ЭМИ связан с дофаминэргическими структурами мозга. В основе эффектов лежит изменение взаимодействия дофамина с рецепторами на пре и постсинаптических мембранах соответствующих структур мозга. Предположение имеет, с точки зрения объяснения механизма, одно несомненное достоинство. Среди множества идентифицированных дофаминовых рецепторов есть ряд таких, как DA_1 и DA_2 , функционирование которых опосредовано аденилатциклазной системой, каскадные реакции которой могут обеспечить биохимическое усиление малых изменений во

взаимодействии дофамина с рецептором. Если ЭМИ влияет на лиганд-рецепторное взаимодействие или на систему мембранного сопряжения рецептора с цитоплазмой (G-белки), то может обеспечить формирование в клетке полновесного физиологического ответа. Вероятно, аналогичным образом ЭМИ может оказывать влияние не только через систему дофаминовых рецепторов, но и через другие рецепторы, располагающие другими типами биохимических каскадов. Помимо перечисленного, предложен ряд механизмов, в которых ключевую роль в формировании эффектов низкоинтенсивных ЭМИ отводится ионам кальция. В этом ряду привлекательной представляется "кальмодулиновая" гипотеза, предложенная Арбером (S.L. Arber, 1986). В соответствии с ней, в клетках, облучённых радиочастотным ЭМИ, понижается избирательность, специфичность одного из мест связывания кальция кальмодулином. Возможно увеличение содержания Ca^{2+} в цитоплазме, особенно если учесть кооперативный характер кальций-кальмодулированного взаимодействия. Избыточное для конкретных физиологических условий содержание ионизированного кальция может запускать определённую цепь биохимических, кальций-зависимых процессов. Конечным результатом будет устойчивое увеличение проводимости мембраны для Са-активируемого К-тока, сопровождаемого изменением мембранного потенциала.

Более поздний и более современный вариант вариант кальциевого механизма, обеспечивающего реакцию клеток на действие слабых электромагнитных полей и излучений, учитывающий наличие амплитудно-частотных "окон" в отклике системы на воздействие, учитывающий порог реакций и их зависимость от функционального состояния объекта, представлен в работах А.Б. Гапеева и Н.К. Чемериса. Базовая модель, отображающая наиболее общие возможности механизма, была разработана применительно к нейтрофилам. Но предложенная модель обладает особенностью она обеспечивает минимизацию числа параметров, описывающих мембраносвязанные процессы клеточной сигнализации. В

результате можно получать зависимости более общего характера, отображающие реакции не только нейтрофилов. В качестве мишени действия модулированного ЭМИ в модели использовались кальциевые каналы плазматической мембраны.

Анализ поведения модели при различных вариантах воздействий и разных функциональных состояниях клетки позволил выявить ряд интересных результатов. Прежде всего, в ответ на воздействие модулированным излучением модель отвечает увеличением внутриклеточной концентрации Ca^{2+} , но для этого необходима сильная химическая стимуляция клетки. Причём характер эффекта зависит от того, началась стимуляция клетки или нет. В случае, когда воздействия ЭМИ начинались после химической стимуляции и концентрация внутриклеточного кальция имела стационарное значение, модулированное воздействие инициировало вынужденные колебания Ca^{2+} . Если химическая стимуляция клетки осуществлялась на фоне электромагнитного воздействия, то при этом так же инициировались вынужденные колебания в концентрации кальция, но только при определённых частотах модуляции. Авторами показано, что модель предсказывает возможность влияния на внутриклеточное содержание кальция шумовых воздействий, а так же зависимости реакции на модулированное воздействие от формы модулирующего сигнала. (А.Б. Гапеев, Н.К. Чемерис, 2000).

Контрольные вопросы.

1. Каков общий подход к пониманию механизмов биологического действия ЭМИ радиочастотного диапазона?
2. Какова физико-химическая причина влияния повышенной температурой на протекание биологических процессов?
3. Каков механизм преобразования электромагнитной энергии, поглощаемой биообъектом, в тепловую?
4. В чем проявляется особенность и общий характер эффектов влияния ЭМИ нетепловой природы?

5. Чем различаются биологические влияния немодулированных и модулированных ЭМИ?
6. Каково содержание классических экспериментов У.Р. Эйди?
7. Какие экспериментальные результаты подтверждают существование «окон по частоте и интенсивности»?
8. Каков первичный механизм теплового действия ЭМИ РЧ?
9. Каким образом формируются микролокальные нагревы биоструктур при воздействии ЭМИ РЧ?
10. Механизм действия ЭМИ при изменении проводимости мембран в случае микролокальных нагревов?
11. Какова роль биологических мембран в формировании эффектов влияния ЭМИ?
12. Какие гипотезы о механизмах нетеплового действия ЭМИ существуют в настоящее время?

**Глава IV. НОРМИРОВАНИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭМИ.
ДЕЙСТВИЕ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭМИ НА БИОСИСТЕМЫ
РАЗНОГО УРОВНЯ ОРГАНИЗАЦИИ.**

Живые системы, под влиянием ЭМП изменяются в зависимости от частотного диапазона, интенсивности, режима модуляции, длительности воздействия, повторности и сочетанности с другими факторами. При действии ЭМИ дециметрового диапазона проводимость мембран биоллипидных мембран (БЛМ и мембран диализированных нейронов) изменяется пропорционально величине усреднённой поглощенной мощности (УПМ). Нагрев изменяет проводимость ионных каналов в соответствие с их температурными коэффициентами. Но в случае, когда скорость подведения тепла за счёт ЭМИ эквивалентна скорости теплоотвода, прирост эффекта нивелируется происходит насыщение. Аналогичная зависимость прослеживается и при действии немодулированного ЭМИ на электрическую активность (ЭА) нейронов. В регуляции ЭА нейронов участвуют системы, противоположным образом реагирующие на электромагнитный нагрев. При разных кинетических характеристиках и не синхронном включении развивается фазный характер реагирования. Следовательно, эффект формируется при пороговых значениях интенсивности, линейно возрастает и выходит

на плато. Аналогичная зависимость характерна для низкочастотных магнитных полей и электрических полей (Плеханов,1990) и в меньшей степени для КВЧ излучений (Голант,1986).

На мембранном уровне (БЛМ) величина эффекта обратно пропорциональна частоте облучающего ЭМИ. Что обусловлено особенностями распределения поля на мембране при разных частотах и поразному обеспечивающему формирование микролокальных нагревов (Тяжелов с соавт.,1983). На клеточном уровне и уровне развивающегося организма зависимость эффекта от несущей частоты не проявляется, хотя микролокальные нагревы возникают в тех местах, куда проникает ЭМИ (скин-слой), и где имеет место гетерогенность структур по диэлектрическим характеристикам. В низкочастотном диапазоне зависимости эффекта от частоты, с точки зрения проникновения поля в объект отсутствует. В диапазоне КВЧ наблюдается зависимость эффекта от частоты излучения, носящая резонансный характер.

Биологические эффекты ЭМИ дециметрового диапазона на клеточном и организменном уровне зависят от частоты модуляции, в то время как на мембранном уровне подобной зависимости не обнаружено. Аналогичная частотная зависимость характерна для формирования биологических эффектов и в низкочастотном диапазоне. Как было показано работами школы Эйди, эффект модулированного дециметрового ЭМИ реализуется в некоем интервале интенсивности, амплитудном "окне". В настоящей работе определение "окна" по интенсивности не проводилось, но было установлено, что частотно зависимые эффекты по величине не пропорциональны интенсивности. На уровне развивающегося организма дрозофил качественно однообразную частотную зависимость биоэффекта можно получить при импульсно модулированном воздействии: ИМ ЭМИ 460 МГц, мощными микроволновыми излучениями с импульсами субмикросекундной, наносекундной длительности и импульсным рентгеновским излучением.

Вероятно, на молекулярно-клеточном уровне у многих биосистем существуют процессы чувствительные к низкочастотному влиянию не тепловыми факторами и изменяются частотно зависимым образом. Возможно, модулированные воздействия более эффективно влияют на биосистемы по сравнению с не модулированными при одинаковой интенсивности, т.к. гипотетический частотно зависимый процесс менее чувствителен к немодулированному воздействию.

Принято считать, что длительное влияние факторов способствуют усилению ответной реакции. Многократное влияние различными факторами на развивающийся организм дрозофилы на разных стадиях развития сопровождается различными изменениями. Многократный нагрев эмбрионов полностью останавливает развитие дрозофил, в случае однократного влияние повышенной температурой эффект незначительный. Многократное действие ЭМИ 460 МГц в эмбриогенезе дрозофил не существенно отличается от однократного. При многократном облучении микроволновыми и рентгеновскими импульсами на всех стадиях развития дрозофилы суммирования не наблюдалось.

Эффекты влияния ЭМИ дециметрового диапазона зависят от функционального состояния биообъекта. На электромагнитное влияние клетки реагируют по-разному. При действии дециметрового диапазона на развивающийся организм дрозофилы характер ответных реакций зависит от стадии развития организма. Чувствительный период к электромагнитному полю отделён от нечувствительного незначительным отрезком времени порядка 10 минут. Влияние внешних факторов в критические периоды (Светлов,1961), приводит к результатам, не сопоставимым с воздействием в стационарные периоды онтогенеза.

Клинико-эпидемиологическая картина влияния радиочастотных ЭМИ на человека. ЭМИ радиочастотного диапазона

обладают высокой биологической активностью, и эффекты влияния могут быть неблагоприятны для организма. В Советском Союзе, начиная с конца 50-х – начала 60-х годов 20 столетия были проведены исследования по изучению здоровья людей в производственных условиях. Длительный контакт людей с ЭМИ, особенно СВЧ-диапазона может привести к развитию заболеваний, клиническую картину которого определяют **прежде всего изменения функционирования нервной и сердечно-сосудистой системы**. Выделена и описана **радиоволновая болезнь** (как нозологическая единица в медицине не принята). Определены три синдрома болезни по мере усиления тяжести её протекания: астенический, астено-вегетативный и гипоталамический синдромы.

Наиболее ранними клиническими проявлениями последствий длительного воздействия СВЧ излучений на человека являются **функциональные нарушения со стороны нервной системы**. Лица, подвергшиеся продолжительному облучению, жалуются на головные боли, слабость, раздражительность, быструю утомляемость, ослабление памяти, нарушение сна, депрессию. Возможно проявления признаков синдрома «частичной атаксии»: парезы, нарушение равновесия, дезориентация в пространстве, головокружение. Наблюдаются признаки синдрома «артомионейропатии»: мышечные боли, мышечная усталость, трудность в подъёме тяжестей.

Нарушения со стороны **сердечно-сосудистой системы (ССС)** проявляют себя лабильностью, варьированием, непостоянством пульса и артериального давления, склонностью к гипотонии, возможными болями в области сердца. Всё это в совокупности диагностируется как нейроциркуляторная дистония. Возможны нарушения в клеточном составе периферической крови: умеренные лейкопения, нейтропения, эритроцитопения и реакция костного мозга как компенсаторный ответ на избыточное производство клеток крови. Изменения обычно

наблюдаются у лиц по роду своей деятельности находившихся под действием излучения высокой (тепловой) интенсивности. Отмеченные расстройства функций ССС являются достаточно стойкими, но они проходят через некоторое время (1 – 2 месяца) после прекращения контакта с источниками излучения.

Неблагоприятное влияние радиочастотного ЭМИ на здоровье людей зависит от продолжительности хронического действия. Установлено, что уже в первые годы работы с источниками излучения работающие начинают жаловаться на головную боль, боли в сердце, повышенную утомляемость, ухудшение памяти, снижение работоспособности. В увеличением стажа работы частота жалоб увеличивается и диагностируются три вышеуказанных синдрома, за которыми развивается патология системы кровообращения: нарушение мозгового или коронарного кровообращения. У работающих с источниками излучения проявляются признаки возрастной патологии: гипертоническая болезнь и атеросклероз головного мозга. Выявляются нарушения и со стороны органов пищеварения: гастриты, гастроудениты, язвенная болезнь и т.д.

С увеличением профессионального стажа развиваются патологические изменения со стороны других органов и систем. Среди прочих, неблагоприятных для организма человека последствий, возможны онкологические заболевания, импотенция и стерильность. Эпидемиологические исследования территорий показали, что как результат электромагнитного облучения возможны лейкомия, рак щитовидной железы, рак лёгкого, рак молочной железы у женщин, работающих с источниками ЭМИ. Развивается синдром раннего старения организма человека со всеми вытекающими последствиями.

Существует реальная угроза здоровью человека и необходимо учитывать режимы модуляции при установлении норм, а так же

учитывать возможность сочетанного влияния ЭМИ с другими экологическими и производственными факторами.

Контрольные вопросы

1. Каковы зависимости влияния ЭМИ на разных уровнях организации живой природы?
2. Как проявляется зависимость эффекта воздействия ЭМИ от интенсивности на разных уровнях организации в разных частотных диапазонах?
3. Возможна ли кумуляция эффектов ЭМИ?
4. Существует ли зависимость биологического эффекта ЭМИ от функционального состояния объекта или стадии его развития?
5. Чем результируется длительное пребывание человека в условиях электромагнитного воздействия?
6. Что такое «радиоволновая болезнь» и каковы её основные синдромы?
7. Как проявляют себя основные клинические нарушения функционирования нервной или сердечно-сосудистой системы после хронического действия ЭМИ?
8. Охранительные меры необходимые для предотвращения неблагоприятного для здоровья человека влияния ЭМИ РЧ?

Нормирование радиочастотных электромагнитных излучений .

Нормирование электромагнитных полей и радиочастотных излучений в бывшем Советском Союзе осуществлялась на хорошем научном уровне. Продуманная система мер обеспечивала разработку адекватных нормативов безопасного действия электромагнитных факторов, и принятые нормативы считались наиболее эффективными в мире. В 1958 году в СССР утверждены на государственном уровне первые нормативы для электромагнитных излучений в диапазоне 300 МГц – 300 ГГц. Первые стандарты основывались на результатах клинико-гигиенических исследований 50-х годов 20 века, подкреплённых имевшимися к тому времени экспериментальными данными. Стандарты предусматривали ограничение двух нормируемых параметров: интенсивности и длительности воздействия с определением трёх предельно допустимых уровней (ПДУ). Они содержали в себе следующее:

10 мкВт/см² – облучение в течение 8 часов; 100 мкВт/см² – до 2 часов; 1000 мкВт/см² – облучение до 20 минут за рабочий день.

В 70-е годы 20 века Совет Министров СССР, Министерство здравоохранения и Министерство обороны уделяли серьёзное внимание проблеме биологического действия ЭМП и радиочастотных ЭМИ в плане исследования их влияния на здоровье человека в условиях профессиональной деятельности.

Исследования проводились в нескольких направлениях и носили комплексный характер:

- изучение механизмов биологического действия ЭМИ;
- изучение биологических эффектов острых и хронических воздействий ЭМИ в экспериментах;
- гигиеническая оценка условий работы на производствах, связанных с воздействием ЭМИ, с выявлением признаков развития профессиональной патологии;
- анализ и обобщение полученных результатов и разработка на основе этого санитарных правил (стандартов ЭМП и ЭМИ) для профессионалов и для населения.

Анализ всей совокупности данных, имевшихся в 1980-х годах, позволил определить пороговые характеристики неблагоприятного воздействия радиочастотного фактора. Для воздействия в течение 2 часов в качестве порогового было принято значение 1 мВт/см^2 и 10 мВт/см^2 при продолжительности воздействия от 6 до 25 минут за рабочий день. С учётом применяемого коэффициента гигиенического запаса, равного 10, в качестве ПДУ были приняты 100 мкВт/см^2 (воздействие 2 часа) и 1000 мкВт/см^2 (воздействие 6 – 25 минут).

На основе достоверных, отчётливо повторяющихся результатов, полученных начиная с 70-х годов 20 века, стратегия нормирования в России для ЭМИ радиочастотного диапазона строится на следующих принципах:

- Учитываются биоэффекты острых однократных облучений ЭМИ РЧ в ближайшем периоде, сразу после облучения с разными значениями потока падающей энергии (ППЭ) (за счёт тепловых и нетепловых механизмов).
- Учитываются результаты хронического действия на экспериментальных животных ЭМИ малых интенсивностей, а также результаты клинико-физиологических наблюдений и гигиенических наблюдений в контролируемых условиях.

- Уровень воздействующего фактора признаётся неблагоприятным, если имеются достоверные отклонения любой жизненно важной функции организма, выходящие за пределы естественных физиологических колебаний этой функции, и стойко сохраняется в период хронического воздействия и после прекращения.

- Как опасное рассматривается сужение адаптационных возможностей организма и его регуляции, выявляемое при помощи функциональных физиологических и экстремальных нагрузок.

- В качестве предельно допустимого уровня для населения принимается дробная величина от минимального уровня электромагнитного излучения, способного вызвать какую-либо реакцию, превосходящую нормальный адаптивный ответ организма в конкретных условиях воздействия ЭМИ. Воздействие не должно вызывать у человека даже временного нарушения гомеостаза, включая репродуктивную функцию, и напряжение защитных и адаптационно-компенсаторных механизмов ни в ближайшем, ни в отдалённом периоде времени.

Одним из определяющих принципов нормирования является приоритет медицинских и биологических критериев над расчётными, техническими и экономическими. С медико-биологической точки зрения при нормировании учитываются разные уровни воздействия ЭМИ. В зависимости от отношения подвергающегося воздействию ЭМИ человека в стандартах России различаются два вида воздействия: профессиональные для работающих с источниками ЭМИ и непрофессиональные - для всего населения.

- Предельно допустимый уровень (ПДУ) для всего населения – это такие воздействия ЭМП, которые приводят к нормальному адаптивному ответу организма без напряжения регуляторных механизмов при длительном воздействии и не вызывают достоверных изменений показателей различных систем организма (т.е. воздействие абсолютно безопасно);

- ПДУ для работающих лиц – воздействия на уровне умеренных компенсаторных систем, характерных для обычного адаптивного ответа организма на внешнее воздействие (по длительности не превышающее рабочую смену);
- предельно переносимые воздействия (ППВ) – это такие воздействия, которые приводят организм к резко выраженному напряжению регуляторных систем, то есть на грань их срыва и перехода в патологическое состояние.

Наиболее щадящие ПДУ установлены для населения. Их значения таковы, что при ежедневном воздействии на население ЭМП не вызывают у людей вне зависимости от пола и возраста заболеваний или отклонений в состоянии здоровья, обнаруживаемых современными методами в период облучения или в отдалённые сроки после его прекращения.

Санитарно-гигиенические нормативы радиочастотных электромагнитных излучений в России.

В России система стандартов по электромагнитной безопасности основывается на Государственных стандартах (ГОСТ) и Санитарных правилах и нормах (СанПиН), которые обязательны для исполнения на территории всего государства. Государственные стандарты допустимых уровней воздействия ЭМИ входят в группу Системы стандартов безопасности труда, комплекса стандартов, содержащих требования, нормы и правила, направленных на обеспечение безопасности, сохранение здоровья и работоспособности человека в процессе труда.

Таблица 10.

ГОСТы РФ по обеспечению электромагнитной безопасности

№	Обозначение	Наименование
ГОСТ (СТ С	ГОСТ 12.1.006-84ССБТ (СТ СЭВ 5801-86)	Система безопасности труда. Электромагнитные поля радиочастот. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

Санитарные нормы и правила регламентируют гигиенические требования более подробно для более конкретных ситуаций облучения. Как правило, санитарные нормы сопровождаются Методическими указаниями по контролю электромагнитной обстановки и проведению защитных мероприятий. Ввод в действие Санитарных норм и правил осуществляет Министерство здравоохранения РФ. Поскольку различается профессиональное и непрофессиональное облучение ЭМИ, стандарты и нормы для них разные. Перечень их приведен в таблицах 11, 12, 13.

Таблица 11.

Санитарные нормы и правила для условий профессионального облучения

№	Обозначение	Наименование	Примечание
1	СанПиН 2.2.4 /2.1.8.055 -96	Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)	Утв. 08.05.96. ГКСЭН

Таблица 12.

Санитарные нормы и правила для условий непрофессионального облучения
(населения)

№	Обозначение	Наименование	Примечание
1	ГН 2.1.8/2.2.4.019-94	Временные допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой связи. Гигиенические нормативы	Утв.27.12.94. ГКСЭН
2	СанПиН 2.2.4/ 2.1.8. 055 - 96	Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)	Утв.08.05.96. ГКСЭН
3	СН № 2666 - 83	Предельно допустимые уровни плотности потока энергии, создаваемой микроволновыми печами	1983 г.

Таблица 13.

Региональные Санитарные нормы и правила для условий непрофессионального облучения (население г. Москвы)

№	Обозначение	Наименование	Примечание
1	СанПиН №6 - 96	Санитарные правила и нормы защиты населения Москвы от электромагнитных полей передающих радиотехнических объектов	Утв. 04.07.96. Главным санитар. врачом г. Москвы
2	МГСН 2.03 - 97	Допустимые параметры ЭМИ в помещениях жилых и общественных зданий и на селитебных территориях	Утв.01.04.97. Правительством г. Москвы

Как видно из последней приведенной таблицы, для жителей г. Москвы установлены отдельные гигиенические требования правительством города.

ЭМИ в диапазоне частот 30 кГц – 300 МГц оценивается по действующему (среднеквадратичному) значению модуля-вектора напряжённости электрической и магнитной составляющих излучения, а в диапазоне частот 300 МГц – 300 ГГц – средним по времени значением ППЭ.

ПДУ для лиц, профессионально подвергающихся воздействию ЭМИ на рабочем месте, рассчитываются в соответствии продолжительностью облучения за смену и частотному диапазону СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Для лиц, работа и облучение которых не связаны с пребыванием в непосредственном контакте с источниками радиочастотных ЭМИ, т.е. фактически для всего населения, существуют фиксированные уровни ПДУ, которые различаются для разных частотных диапазонов. ПДУ для населения следующие:

- 30 кГц – 300 кГц.....25 В/м;
- 0,3 МГц – 3 МГц.....15 В/м;
- 3 МГц – 30 МГц.....10 В/м;
- 30 МГц – 300 МГц.....3,0 В/м;
- 300 МГц – 300 ГГц.....10 мкВт/см².

Существует регламентация ЭМИ, генерируемых телевизионными и радиолокационными станциями специального назначения, работающими в режиме кругового обзора или сканирования.

ПДУ для жителей г.Москвы более жёсткие и они разделены на две подгруппы в зависимости от места пребывания людей. Для условий пребывания на территории г.Москвы, в общественных, служебных и производственных зданиях ПДУ следующие:

- 30 кГц – 3 МГц.....15 В/м;
- 3 – 30 МГц.....10 В/м;
- 30 МГц – 300 МГц.....3,0 В/м;
- 300 МГц – 300 ГГц.....3,0 мкВт/см².

Для жителей Москвы и приезжих людей, пребывающих в условиях жилых зданий любого типа, детских образовательных и учебно-воспитательных учреждений стационарного типа и их территории, интернатах всех типов и их территории, гостиницах и других учреждениях, предназначенных для круглосуточного пребывания ПДУ :

- 30 кГц – 3 МГц.....10 В/м;
- 3 – 30 МГц.....7,0 В/м;
- 30 МГц – 300 МГц.....2,0 В/м;
- 300 МГц – 300 ГГц.....2,0 мкВт/см².

Для разных категорий облучаемого населения России разработаны Временные допустимы уровни (ВДУ) воздействия ЭМИ, создаваемых системами сотовой связи. В случае профессионального воздействия ВДУ рассчитывается по формуле $ППЭ_{пду} = 200/T$, где 200 мкВт×час/см² – предельно допустимое воздействие продолжительностью T. При этом максимально допустимое значение ППЭ = 1000 мкВт/см². Для пользователей радиотелефонов поток падающей энергии (ППЭ) составляет 100 мкВт/см², а для населения, проживающего на территории, вблизи от антенн базовых станций ППЭ не должна превышать 10 мкВт/см². Для пользователей СВЧ-печей ПДУ составляет 10 мкВт/см².

В России не приняты экологические нормативы применительно к электромагнитному влиянию и все экологические экспертизы проводятся исходя из существующих санитарных норм и правил, о которых говорилось выше.

Стандарты электромагнитной безопасности России отличаются от стандартов других государств: США, Канады, Японии, Германии, Болгарии, Польши и др. Например, стандарты Японии ограничивают профессиональное облучение целого тела величиной удельной поглощаемой мощности (УПМ) (SAR) не более 0,8 Вт/кг, облучение участка тела не более 10 - 20 Вт/кг. Для условий окружающей среды (облучение населения) при облучении всего тела величина SAR не должна превышать 0,4 Вт/кг, локальное облучение допускается при 2 – 4 Вт/кг. По стандартам Канады, при профессиональном облучении тела, воздействии на глаза SAR не должен превышать 0,4 Вт/кг, при локальном облучении – не более 8 – 25 Вт/кг в зависимости от объёма локального воздействия. Непрофессиональное облучение тела или глаз не должно быть больше 0,2 Вт/кг и 4 – 12 Вт/кг – локальное воздействие. По данным ПДУ для профессионального облучения в США, Германии, Великобритании, Франции, Швеции, Норвегии, Финляндии, Дании и др. составляет 10 мВт/см².

Сопоставление гигиенических стандартов определённо указывает на наиболее высокие требования безопасности в российских стандартах. Что обусловлено некоторыми различиями в подходах к нормированию. В России до настоящего времени используется в нормировании т.н. «энергетическая нагрузка», т.е. суммарный поток энергии, падающий на единицу облучаемой поверхности за время облучения в часах. В США и других странах по рекомендации NCRP (Национальный совет по радиационной защите США) ЭМИ нормируется по коэффициенту поглощённой энергии – SAR (УПМ).

Есть традиционные различия в подходах к оценкам зарегистрированного биоэффекта, который может быть существенен для определения опасности ЭМИ: а) эффекты к которым организм человека может адаптироваться б)

должны учитываться только те эффекты, которые принято относить к патологическим.

Американскими учёными и учёными некоторых Европейских стран недооценивается роль модуляции. Эффекты модулирующих излучений они не принимают в расчёт при нормировании, т.к. эффекты обратимы. Диапазон эффективных модулирующих частот узок и эффекты пока трудно соотнести со здоровьем человека. В настоящее время накоплены данные, опровергающие такой подход.

Существуют различные требования к отбору и оценке опубликованных работ для обоснования нормативов (в России не приняты рекомендации ICNIRP – Международной комиссии по защите от неионизирующих излучений).

Общая точка зрения на проблемы нормирования ЭМИ заключается в том, что разрабатываются и используются отдельные нормативы для профессионалов и населения, и существует одинаковый коэффициент «гигиенического запаса» (фактор уменьшения ПДУ), равный 10, достаточный для достижения гарантии безопасности и устранения биологической неопределённости.

По мнению председателя Российского национального комитета по защите от неионизирующих излучений профессора Ю.Г. Григорьева, для гармонизации и сближения стандартов необходимо в рамках проекта ВОЗ выполнение целого ряда мероприятий.

- Разработать единые критерии оценки опасности (сблизить подходы), оценки индивидуальной радиочувствительности, гиперчувствительности.
- Необходимо учитывать хроническое многолетнее облучение с оценкой отдалённых последствий, возможности кумуляции.
- Определить степень опасности для модулированного электромагнитного излучения.
- Разработать подходы оценки накопленной поглощённой дозы при локальном и общем облучении в зависимости от длины волны, поляризации, облучения в свободном и экранированном пространстве.

- Требуется дальнейшая разработка методологии проведения эпидемиологических и медико-гигиенических исследований.
- Подлежат дальнейшей разработке подходы переноса (экстраполяции) экспериментальных данных, полученных на животных, на человека.
- Интенсивное изучение опасности влияния новых источников ЭМИ на человека, например, мобильной связи.
- Внедрить в России систему оценки данных, используемых при разработке нормативов, рекомендации ICNIRP.
- Создать при ICNIRP или Международной программе ВОЗ «ЭМП и человек» временную совместную рабочую группу из учёных Европейских стран, США и России для адаптации и реализации возможных подходов к гармонизации Международных стандартов.

Инструментальный контроль электромагнитной обстановки.

Для сопоставления существующего уровня электромагнитных излучений в окружающем пространстве с гигиеническими нормативами необходим инструментальный контроль, измерение параметров ЭМИ с помощью приборов в контролируемых местах. Методика измерения интенсивности ЭМИ радиочастотного диапазона изложена в Приложении 1 СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96 «Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ)». Более подробно дозиметрия ЭМИ РЧ различных диапазонов и различных источников представлена в ряде методических указаний:

МУК 4.3.044-96 «Определение уровней ЭМП, границ санитарно-защитной зон и зон ограничения застройки в местах размещения передающих средств радиовещания и радиосвязи километрового, метрового и дециметрового диапазонов»;

МУК 4.3.045-96 «Определение уровней электромагнитного поля в местах размещения средств телевидения и ЧМ-радиовещания»;

МУК 4.3.680-97 «Определение плотности потока излучения электромагнитного поля в местах размещения радиосредств, работающих в диапазоне частот 700 МГц – 300 ГГц».

При проведении инструментального контроля электромагнитной обстановки (измерении уровней электрической или магнитной составляющих ЭМИ РЧ, измерении ППЭ) необходимо соблюдение условия минимально допустимого расстояния датчика приборов от излучающих элементов:

- 30 см для диапазона 10 – 100 кГц;
- 25 см для диапазона 0,1 – 3 МГц;
- 15 см для диапазона 3 – 10 МГц;
- 10 см для частот выше 10 МГц.

Инструментальный контроль электромагнитного загрязнения проводится с помощью приборов специализированного назначения, обеспечивающих измерение интенсивности электрической компоненты поля, магнитной или ППЭ. Для измерения уровней электрической составляющей в диапазоне частот 3 кГц – 300 МГц используются приборы, предназначенные для определения среднеквадратических (действующих) значений напряжённости поля **E** в пределах 0 – 5000 В/м с погрешностью в пределах $\pm 30\%$ или ± 3 дБ.

Перечень соответствующих приборов представлен в таблице

Измерение уровней магнитной составляющей ЭМИ обеспечивается приборами, определяющими также среднеквадратические (действующие) значения напряжённости магнитного поля **H** излучения в пределах значений 0 – 250 А/м или плотности потока магнитной индукции **B** в пределах 0 – 3 мТл с допускаемой относительной погрешностью $\pm 30\%$ или ± 3 дБ. Перечень приборных средств для измерения магнитной составляющей ЭМИ представлена в таблице 14.

Таблица 14.

Приборы для измерения напряжённости электрического поля **E** в диапазоне частот 3 кГц – 300 МГц .

Тип прибора	Измеряемый	Пределы	Относительная	Страна-
-------------	------------	---------	---------------	---------

	диапазон	Измерений (В/м)	погрешность	производитель
ПЗ-15/16/17	0.01-300 МГц	1 - 3000	± 3 дБ	Россия
ПЗ-21	0.01-300 МГц	1 - 1000	± 3 дБ	Россия
ПЗ-22	0.01-300 МГц	1 - 3000	± 2,5 дБ	Россия
ПЗ-25	0,02 - 20 кГц	50-12000	± 20%	Россия
ПЗ-26	0,02 - 20 кГц	50-12000	± 20%	Россия
ИПМ-101(М)	0,03 – 1200 МГц 2,4 – 2,5 ГГц	1 - 500	± (20 – 40) %	Россия
NFM – 1	0,06 – 300 МГц	2 - 1500	± 20%	Германия
EFA – 3	0,05 – 30 кГц	0,5 - 10000	± 5 %	Германия
EMR-20/30	0.1-3000 МГц	0,8 - 800	± 3 дБ	Германия
EMR-200/300	0,1–18000 МГц	1 - 1000	± 3 дБ	Германия

Для измерения интенсивности ЭМИ с частотами выше 300 МГц используются приборы, определяющие средние по времени значения потока потока энергии (ППЭ плоской волны в пределах значений 0 – 100 мВт/см² с допускаемой относительной погрешностью ± 30% (± 3 дБ), (Таблица 15). Возможно применение приборов для измерения среднеквадратичных значений напряжённости электрического поля Е в пределах 0 – 5000 В/м и напряжённости магнитного поля Н в пределах 0 – 2500 А/м с допускаемой относительной погрешностью ± 30%. Значения ППЭ в этих случаях рассчитываются по формуле:

$$\text{ППЭ} = E^2 / 3,77 = 37700 \times H^2 \text{ [мкВт/см}^2\text{]},$$

где Е [В/м] – действующее (среднеквадратичное) значение напряжённости электрического поля;

Н [А/м] - действующее (среднеквадратичное) значение напряжённости магнитного поля.

Приборы для измерения напряжённости магнитного поля H и плотности потока магнитной индукции B в диапазоне частот 3 кГц – 300 МГц (Электромагнитная безопасность человека, 1999)

Тип прибора	Измеряемый диапазон	Пределы измерений	Относительная погрешность	Страна-производитель
Г – 79	0,02 – 20 кГц	0,1 – 1000 мТ	± 5%	Молдова
Г – 703	0,02 – 20 кГц	0,1 – 1000 мТ	± 5%	Молдова
ПЗ-15/16/17	0.01-30 МГц	0,5 – 500 А/м	± 3 дБ	Россия
ПЗ-21	0.01-30 МГц	0,5 – 16 А/м	± 3 дБ	Россия
ПЗ-22	0.01-300 МГц	0,5 – 500 А/м	± 2,5 дБ	Россия
ИПМ-101(М)	0,03 – 50 МГц	0,1 – 50 А/м	± (20 – 40) %	Россия
NFM – 1	0,1 – 10 МГц	1 – 10 А/м	±20%	Германия
EFA – 1/2/3	0,05 – 30 кГц	0,04 – 10000 мТ	± 3 %	Германия
EMR-200/300	0,03 – 1000 МГц	0,03 – 250 А/м	± 3 дБ	Германия

Таблица 16

Приборы для измерения плотности потока энергии в диапазоне частот выше 300 МГц (Электромагнитная безопасность человека, 1999)

Тип прибора	Измеряемый диапазон	Пределы измерений	Относительная погрешность	Страна-производитель
ПЗ-18/19/20	0,3 – 39,65 ГГц	0,32 - 3200 мкВт/см ²	± 3 дБ	Россия
ПЗ-18А/19А	0,3 – 40 ГГц	0,9 – 3200 мкВт/см ²	± 3 дБ	Россия
ПЗ-23	37,6 – 118,1 ГГц	0,9 – 3200 мкВт/см ²	± 2,5 дБ	Россия
ИПМ-101(М)	0,03 – 1200 МГц 2,4 – 2,5 ГГц	1–500 мкВт/см ²	± (20 – 40) %	Россия
EMR-20/30	0,1 – 3000 МГц	0,17-17000	± 3 дБ	Германия

		мкВт/см ²		
EMR-200/300	0,1 –18000 МГц	0,27-265000	± 3 дБ	Германия
		мкВт/см ²		

Биоиндикация радиочастотного электромагнитного загрязнения окружающей среды. Инструментальный контроль или мониторинг электромагнитной обстановки относительно просто может быть реализован в условиях производственных помещений или на территории населённых пунктов. Ситуация оказывается не столь простой, если необходимо контролировать территории природных комплексов, находящихся под воздействием ЭМИ. В подобном случае, вероятно, предпочтительнее использовать биоиндикацию, т.е. отслеживать на контролируемой территории признаки неблагоприятного влияния облучения территории по индикаторным видам животных и растений. К настоящему времени отсутствуют чёткие и общепризнанные индикаторы неблагоприятного влияния радиочастотных ЭМИ на природные комплексы. Известна попытка использовать в качестве индикаторов развивающийся организмы: дрозофилы, гнездовая экология птиц, развитие эмбрионов рыб, земноводных и т.д. (Карташев, 1999).

Контрольные вопросы.

1. Стратегия нормирования ЭМИ РЧ в России?
2. Общая характеристика ПДУ, лежащих в основе нормирования.
3. Какие стандарты безопасного воздействия ЭМИ РЧ приняты в России?
4. В чём принципиальное различие нормирования в России в сравнении и другими странами?

5. Что предполагает гармонизация стандартов безопасного действия ЭМИ?
6. Основные принципы дозиметрии?
7. Биоиндикация радиочастотного электромагнитного загрязнения среды обитания?

СИСТЕМА МЕР ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Существующая система мер электромагнитной безопасности основывается на санитарно-гигиенических регламентациях, ориентированных на выполнение требований ГОСТов и СанПиНов.

Существующие меры безопасности включают в себя:

- организацию санитарно – защитных зон в местах функционирования радиотехнических комплексов, генерирующих в пространство ЭМИ;
- экранирование жилых зданий или помещений от источников излучения ЭМИ;
- обеспечение уровней облучения на рабочих местах в пределах ПДУ;
- выполнение профилактических мероприятий, снижающих возможность неблагоприятного влияния ЭМИ РЧ или обеспечивающих эффективную реабилитацию.

Необходимость создания санитарно-защитных зон определяется тем, что источники РЧ ЭМИ большой мощности создают на значительном удалении от антенн поля, интенсивность которых может в сотни и тысячи раз превышать ПДУ. Санитарно-защитные зоны обеспечивают ограничения доступа людей в места с опасно высокими уровнями ЭМИ. Размеры санитарно-защитных зон применительно к разным источникам ЭМИ и условия их установления регламентируются СанПиНами.

Экранирование свободного пространства от источников, генерирующих ЭМИ РЧ, снижает уровень распространения излучения в свободное пространство. Экранирование рабочих помещений и зданий обеспечивается в соответствии с требованиями ГОСТа и СанПиН. Ослабление интенсивности воздействия достигается использованием защитных материалов, отражающих или поглощающих ЭМИ. Хорошими радиоотражающими возможностями обладают металлические листы и металлическая сетка. Помещения, покрытые таким образом или конструктивно их содержащие, ослабляют влияние излучений. Хорошими поглотителями энергии ЭМИ являются растения или деревья вокруг зданий или сооружений за счёт высокого содержания воды в них. Поэтому растительность возле домов и по стенам домов так же защищает от проникновения ЭМИ.

Соблюдение требований ПДУ на рабочих местах обеспечивается регламентом времени облучения или достигается использованием специальных средств защиты от ЭМИ. Последнее актуально в случае опасных режимов производства. В подобных случаях организм работающего защищает специальная защитная одежда и защитные очки. Одежда изготавливается из защитной радиоткани, содержащей тонкоячеистую металлическую сетку. Защитные очки имеют стёкла с тонким металлическим покрытием, пропускающим световые волны, но отражающим радиоволны.

Помимо снижения уровней облучения на рабочем месте и защиты от высоких уровней ЭМИ применяются и другие профилактические меры. В частности, есть ограничение по возрасту (не моложе 18 лет), полу (женщины), состоянию здоровья (ряд заболеваний) при приёме на работу, связанную с пребыванием в условиях облучения ЭМИ РЧ. Претенденты на вакансии проходят предварительный медицинский осмотр в соответствии с регламентными документами МЗ России. Раз в год проводится профилактический медицинский осмотр работающих с источниками ЭМИ. В случае обнаружения признаков ухудшения здоровья даётся рекомендация о возможности дальнейшей работы с источниками ЭМИ или переводе на другие места производства, не связанные с электромагнитным облучением.

Изложенные меры безопасности не являются абсолютными, они требуют совершенствования и доработки. Тем не менее, они выполняются и обеспечивают защиту людей от неблагоприятного действия ЭМИ РЧ. Вопрос о неблагоприятном действии электромагнитных излучений на живую природу остаётся открытым.

Контрольные вопросы.

1. Меры безопасности, предохраняющие здоровье человека от вредного действия ЭМИ РЧ?
2. Что такое санитарно-защитная зона?
3. В чём заключается экранирование зданий и сооружений от ЭМИ?
4. Какие профилактические меры предпринимаются для сохранения здоровья человека?

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЭМИ.

В настоящее время отсутствуют экологические нормативы безопасного для природных комплексов действия электромагнитных полей или излучений. При проектировании и строительстве различного рода радиотехнических комплексов, систем энергетики, коммуникации, автоматики и контроля возможное неблагоприятное влияние полей или излучений на природу оценивается исходя из гигиенических норм и правил, разработанных применительно к человеку в условиях производственной деятельности и проживания в населённых пунктах. Эти же нормы и правила используются при проведении экологических экспертиз различных проектов. С общебиологической и экологической точки зрения нельзя исключить неблагоприятного действия ЭМИ на элементы природных комплексов, трофические цепи и биоценозы. Имеющиеся экспериментальные данные убедительно свидетельствуют, что радиочастотные ЭМИ, особенно импульсно-модулированные оказывают негативное влияние на развитие насекомых. Увеличивается частота тератогенных эффектов различного рода: нарушение полового аппарата, развитие конечностей, гибель организмов во время развития, половой дисбаланс у имаго и частичной стерильности особей, облучённых во время развития. Не исключено, что подобное тератогенное влияние ЭМИ способны оказывать на птиц, животных и растения. Неблагоприятное влияние на развивающийся организм изменяет динамику численности популяций и структуру сообществ.

Второй глобальной и серьёзной проблемой, связанной с электромагнитным облучением, является проблема воздействия на людей ЭМИ мобильной связи, сотовых телефонами. При пользовании сотовым телефоном облучению подвергается как сам пользователь, так и окружающие его люди, причём последние подвергаются воздействию несанкционированно, т.е. без своего согласия. Наиболее часто облучение

происходит в общественном транспорте и в общественных местах. При использовании сотовым телефоном вне дома на расстоянии около 70 метров от источника ППЭ составляет $0,5 \text{ мкВт/см}^2$, что ниже безопасного уровня воздействия. Если сотовый телефон используется в помещении, то в соседней комнате на расстоянии 3 метров от антенны ППЭ может достигать 400 мкВт/см^2 и эта величина выше уровня, безопасного для здоровья излучения сотового телефона, равного 100 мкВ/см^2 . Японские учёные установили, что использование большого числа мобильных телефонов в замкнутом пространстве приводит к превышению уровня излучения над установленными международными нормами безопасности. В ряде стран, в частности, Швеции и Норвегии, на основе анкетирования проведён анализ мнения пользователей сотовых телефонов о состоянии здоровья. Выявлены жалобы на ухудшение состояния неврологического характера: головокружение, головная боль, ухудшение памяти, снижение концентрации внимания, а так же снижение тургора (упругости) кожи лица, чувство жжения, ощущения тепла позади уха и самого уха. Для проверки возможности неблагоприятного влияния излучения сотовых телефонов в ряде стран, в том числе и в России проведены исследования на добровольцах. Регистрировались различные физиологические, биохимические, клинические и психологические показатели пользователей сотовых телефонов до, во время и после разговора различной продолжительности. Удалось выявить ряд нарушений функционирования организма: изменение биоэлектрической активности мозга, снижение познавательной деятельности, гормональные сдвиги. Международные эксперты (США, Великобритания, Канада и скандинавские страны) на основании анализа проведенного на добровольцах исследования сделали вывод о возможности неблагоприятного влияния электромагнитного излучения сотовых телефонов на здоровье пользователей.

Влияние излучений сотовых телефонов необходимо рассматривать в двух аспектах: **локальные тепловые эффекты**, обусловленные повышением температуры кожи головы, уха, барабанной перепонки уха, возможно, мозга,

а так же возможное развитие нетепловых эффектов; **эффекты воздействия на людей ЭМИ базовых станций.** Причиной **локальных эффектов** является повышение температуры кожи головы и различных областей уха. Степень нагрева определяется продолжительностью разговора и типом используемого аппарата. По разным оценкам температура кожи может увеличиваться от единиц градусов до более десятка градусов. На 22-й ежегодной конференции Общества биоэлектромагнитных исследований (Мюнхен, 2000 г.) представлены данные: 6-7 минутный разговор по сотовому телефону приводит к повышению температуры поверхности мозга на 0,1 градуса. Следовательно, происходит поглощение энергии ЭМИ с удельной поглощенной мощностью (УПМ) в пределах 1 – 8 Вт/кг. Известно, что немодулированное ЭМИ с УПМ 8 Вт/кг меняет электрическую активность нейронов, а импульсно модулированное ЭМИ влияет на функционирование нервных клеток и при меньших УПМ, начиная от 0,5 Вт/кг. Возможна инициация потенциально патологического режима нейронной активности «вспышечной», характерной для эпилептических синдромов.

При оценке опасностей, связанных с **излучением базовых станций** сотовой связи исходят прежде всего из того обстоятельства, что **они максимально приближены к местам проживания людей.** В России в 2003 г. насчитывалось более 2000 базовых станций при охвате сотовой связью 1% населения. По стандартам, действующим в России, базовые станции являются приёмо-передающими радиотехническими объектами, излучающими электромагнитную энергию в диапазоне (300 – 3000 МГц). Каждая базовая станция оснащена комплектом приёмо-передающего оборудования радиорелейной связи, работающего в СВЧ-диапазоне (3 – 30 ГГц). Выходная мощность излучения передатчиков по несущей частоте составляет в пределах 5 – 10 Вт. Базовые станции являются источниками, нагрузка которых непостоянна во времени и зависит от количества абонентов, обслуживаемых в данный момент. Количество абонентов связано

с месторасположением станции, временем суток (наибольшая загрузка с 8 утра до 23 ночи и особенно с 9 до 20 часов) и днём недели.

- Благодаря относительно большой высоте размещения станций (15 – 100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках: общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, трубах промышленных предприятий или на специально сооружённых мачтах) и характеристикам диаграмм направленности антенн в подавляющем большинстве случаев у источников отсутствует санитарно-защитная зона. Интенсивность радиочастотных ЭМИ, создаваемых базовыми станциями на территории жилой застройки (селитебной территории) «на уровне земли» не превышает предельно допустимых значений.

- Гигиенически значимые (опасные) уровни радиочастотного ЭМИ могут быть зарегистрированы только в непосредственной близости, на расстоянии 3 – 5 метров от передающих антенн базовой станции. Из-за переотражений ЭМИ существует вероятность обнаружения гигиенически значимых уровней излучения базовых станций в помещениях и балконах последних этажей зданий, на которых расположены передающие антенны и в помещениях верхних этажей зданий первой линии застройки в радиусе 200 – 300 метров от базовой станции.

- Приёмо-передающее оборудование базовых станций (кроме антенн) не является источником, потенциально опасным с точки зрения биоэлектромагнитной совместимости.

В документе представлена концепция предупредительной политики в обеспечении электромагнитной безопасности.

Принцип предупреждения заключается в принятии такой стратегии управления рисками, когда существуют условия научного сомнения в наличии опасности, в частности, от электромагнитного воздействия. Предпринимаемые меры необходимы для избегания серьёзного риска, не дожидаясь окончательных результатов научных исследований опасности. Попросту говоря, **если есть сомнения в существующей опасности, но её**

можно полностью устранить, приняв финансово не обременительные меры, эти меры необходимо принять и предупредить опасность. Концепция предупреждения применительно к электромагнитным полям и излучениям уже выполняется рядом стран, в их числе Швейцария, Италия, Австрия, Швеция, Венгрия, Израиль и др. В этих странах считают, что **необходимо принятие простых, легко достижимых и недорогих мер для уменьшения воздействия ЭМИ даже в условиях отсутствия видимого риска.**

Проблема возможного неблагоприятного влияния ЭМИ сотовой связи является сложной и комплексной. Решение включает научную компоненту, юридическую, экономическую и социальную. Приведены в качестве примера «Рекомендация» Восьмой сессии Конгресса местных и региональных властей Европы и «Сообщение для средств массовой информации» от Российского национального Комитета по защите от неионизирующих излучений.

РЕКОМЕНДАЦИЯ 95 (2001) о базовых станциях мобильной телефонной связи и местных/региональных властях.

Восьмая сессия Конгресса местных и региональных властей Европы (Страсбург, 29-31 мая 2001 г.)

КОНГРЕСС,

- Принимая во внимание бурное развитие телефонной связи в Европе и во всём мире;

- Признавая растущую потребность в современной системе телефонной связи и её экономической выгоды;

- Осознавая, что обзримой перспективе использование мобильных телефонов и смежных технологий будет по-прежнему возрастать;

ПРИНИМАЯ ВО ВНИМАНИЕ:

- Руководящие принципы ограничения облучения от меняющихся во времени электрических, магнитных и электромагнитных полей (вплоть до

300 ГГц), опубликованных Международной комиссией по защите от неионизирующей радиации (ICNIRP) в апреле 1988 года;

- Рекомендации. Совета ЕС от 12 июля 1999 года об ограничении населения электромагнитными полями (от 0 герц до 300 гигагерц);

- Ведущиеся в настоящее время международные исследования по вопросу о возможных последствиях использования мобильной телефонии для здоровья человека;

УЧИТЫВАЯ, ЧТО:

- Ширится распространение мачтовых антенн в Европе, которые часто возводятся вблизи от жилых объектов без информирования общественности и консультаций с жильцами по вопросу о напрямую затрагивающем их удобство строительстве;

- Это положение вызывает озабоченность общественности, а также местных и региональных властей в связи с видимым отсутствием контроля над планированием и мониторинга;

- Существует большое разнообразие национальных стандартов и законов о пределах облучения электромагнитными полями;

- Вопросы охраны здоровья, включая последствия облучения электромагнитными полями, созданными телекоммуникационным оборудованием, отличаются сложностью;

- Всемирная организация здравоохранения ведёт наблюдение за воздействием электромагнитными полями на здоровье населения, несмотря на отсутствие в настоящее время убедительных научных доказательств потенциальных последствий для здоровья и риска для общества;

- Некоторые районы являются более экологически чувствительными, чем другие, к ним относятся жилые кварталы, школы, больницы, природоохранные зоны и другие районы, требующие более осторожный подход к размещению объектов;

- Пробелы в нынешних знаниях достаточны, чтобы оправдать осмотрительный подход;

- Большинство местных и региональных властей требуют повышения уровня контроля, выражая озабоченность в связи с качеством и эффективностью процесса, а также с нерешённостью проблемы местной демократии и подотчётности;

- Во многих странах отсутствуют ясные указания центрального правительства по этому вопросу; соответственно, ясная и твёрдая линия правительства по всему диапазону вопросов в пределах рамок национальной политики с возможностью применения более стратегического подхода на местном и региональном уровнях;

- Законодателям следует признать необходимость компромисса между поощрением строительства телекоммуникационных сетей на благо потребителей и экономики в целом и учётом эстетических, экологических и медико-санитарных интересов населения;

- Национальные, региональные и местные власти, учёные, представители отрасли и потребители должны принять активное участие в рассмотрении вопросов о возможных последствиях для здоровья человека технологии мобильной телефонной связи;

РЕКОМЕНДУЕТ, ЧТОБЫ КОМИТЕТ МИНИСТРОВ:

- Внимательно отслеживал проект ЭМП Всемирной организации здравоохранения, направленный на согласование норм в этой области на основе самой передовой имеющейся научной информации;

- Признать озабоченность общественности последствиями облучения электромагнитными полями для здоровья человека в связи с мобильной телефонией;

РЕКОМЕНДУЕТ, ЧТОБЫ ПРАВИТЕЛЬСТВА ГОСУДАРСТВ-ЧЛЕНОВ:

- В качестве меры предосторожности приняли самые строгие действующие в настоящее время национальные ограничения или, по крайней мере, рекомендованные ICNIRP/ Советом ЕС нормы ограничения облучения электромагнитными полями;

- Разработали руководящие указания применительно к экологически чувствительным районам с целью сведения к минимуму воздействия телекоммуникационных объектов. Районы расположения школ, яслей, больниц и жилых кварталов следует рассматривать как чувствительные по экологическим и медико-санитарным соображениям; определение экологически чувствительных районов в зависимости от специфики территории следует отнести к компетенции властей, отвечающих за её обустройство;

- Разработали ясные и твёрдые государственные нормативы по диапазону вопросов в пределах рамок национальной политики на основе национального плана развития телефонной связи. В этих нормативах должны быть отражены следующие вопросы: планирование и развитие, мониторинг и отчётность, охрана здоровья и безопасность, обязательства операторов и требуемая от них информация, роль и ответственность различных властей и ведомств;

- Использовали в основе государственных нормативов осмотрительный подход и учитывали вопросы, относящиеся к охране здоровья в качестве существенных соображений при обустройстве территорий;

- Представляли детальные указания местным и региональным властям по вопросу о применении осмотрительного подхода и включение охраны здоровья в систему планирования;

- Консультировались со всеми заинтересованными органами, включая ассоциации местных и региональных властей, строителями и операторами телекоммуникационных объектов, в процессе разработки политических рамок и руководящих указаний с целью учёта всех относящихся к ним вопросов;

- Отвели первоочередное внимание независимым исследованиям по вопросам воздействия на здоровье человека электромагнитных полей и телесвязи, следили за результатами научных и медицинских исследований и учитывали их при разработке национальной политики по этому вопросу;

- Обеспечивали вклад телекоммуникационной отрасли в исследования по вопросу о влиянии на здоровье и включение в рекламу в сфере мобильной телефонии предупреждений о потенциальных последствиях для здоровья человека;

- Укрепили полномочия местных и региональных органов самоуправления в отношении решений применительно к размещению, строительству и переоборудованию телекоммуникационных объектов в их районах;

- Ввели процедуру планирования с целью придания местным и региональным властям более широких полномочий по контролю за размещением мачтовых антенн телесвязи и смежного оборудования, создав им возможность для разработки собственной телекоммуникационной политики в пределах рамок национальной политики;

- Обеспечили обязательное соблюдение местной демократической процедуры в процессе планирования, через общественные опросы, информирование жителей района и связь между операторами теле связи и местными властями, в частности, в отношении предшествующих подаче заявок обсуждений;

- Поощряли работу строителей/ операторов телекоммуникационных объектов с местными и региональными властями на ранних этапах моделирования и составления карт своих сетевых потребностей для обсуждения вопросов размещения и сведения к минимуму экологических последствий посредством совместного использования мест расположения и/ или совместного использования мачт, конструкционных решений и маскировки;

- Поощряли активное участие операторов в общенациональных роуминговых соглашениях, т.е. когда клиенту одной сети разрешается использовать сеть другого оператора, в результате чего сокращается дублирование инфраструктурного обеспечения;

- Потребовали от строителей и операторов стараться воздерживаться от размещения телекоммуникационных объектов в экологически чувствительных районах, а в тех случаях, когда иные варианты размещения отсутствуют сводить экологические последствия к минимуму посредством тщательного отбора местоположения, проектирования и применения технологических решений;

- Рассмотрели возможность назначения уполномоченного для содействия принятию решений о размещении базовых станций мобильной телефонной связи в случае возможности достижения договоренности на местах, а также по другим актуальным вопросам;

- Обеспечили наличие более обширной информации о местах развития телесвязи на основе обязательного предоставления информации строителями и операторами телекоммуникационных объектов, а также на национальной основе вели реестр развития телекоммуникационных объектов с использованием Географической информационной системы (ГИС);

- Разработали стратегию мониторинга за телекоммуникационными установками с подробным изложением ответственности всех сторон и обязательным для операторов телесвязи ежегодной экспертизы телекоммуникационной инфраструктуры.

Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений принял решение довести до сведения населения России рекомендации об элементарных правилах безопасности и гигиены при обращении с сотовыми телефонами:

1. рекомендовать не использовать сотовые телефоны детям и подросткам до 16 лет;

2. рекомендовать не использовать сотовые телефоны беременным, начиная с момента установления факта беременности и в течение всего периода беременности;

3. рекомендовать не использовать сотовый телефон лицам, страдающим заболеваниями:

- неврологического характера, включая неврастению, психопатию, психостению, неврозы, клиника которых характеризуется астеническими, навязчивыми, истерическими расстройствами, а также снижением умственной и физической работоспособности, снижением памяти, расстройствами сна;
- эпилепсия и эпилептический синдром, эпилептическая предрасположенность.

4. при использовании сотового телефона принимать меры по ограничению воздействия электромагнитного поля, а именно, ограничить продолжительность разговора (продолжительность однократного разговора – до 3 минут), максимально увеличить период между двумя разговорами (минимально рекомендованный – 15 минут), преимущественно использовать сотовые телефоны с гарнитурами и системами «свободные руки» (“hands free”).

Электромагнитное поле сотового телефона проникает в голову человека, и эта ситуация является принципиально новой и мало изученной наукой. Эксперименты, проводившиеся на животных, показывают, что последствия могут быть крайне опасными, особенно для развивающегося организма ребёнка, включая стадию внутриутробного развития. Возможные последствия могут проявиться через несколько лет продолжительного облучения и особенно на новом поколении. Современная ситуация с оценкой биологического действия электромагнитного поля напоминает конец 50-х годов 20 века, когда происходило накопление знаний о биологическом действии ионизирующего излучения. Сейчас уже все знают, как пришлось расплачиваться населению многих районов страны и мира за недооценку вреда радиации.

Существует ещё одна проблема, связанная с **регламентацией принципиально новых источников импульсного микроволнового облучения с импульсами наносекундной длительности.**

В последние два десятилетия были разработаны и начали использоваться для некоторых научных и научно-технических целей релятивистские СВЧ-генераторы мощных электромагнитных импульсов субмикросекундной и наносекундной длительности (1 наносекунда = 10^{-9} с). Они генерируют в периодическом режиме (1 – 100 Гц и более) излучение с частотами в диапазоне 1 – 10 ГГц (длина волны 30 – 3 см). Влияние такого излучения на различные живые системы может быть весьма значительным и своеобразным. ЭМИ фактор характеризуется очень большой величиной энергии в импульсе (порядка миллиджоуля на квадратный сантиметр, высокой напряжённостью электрического поля (до $1,4 \times 10^4$ В/ см), а так же сопутствующим импульсным рентгеновским излучением в единицы мРад за импульс.

Имеющиеся экспериментальные результаты продемонстрировали биологическое действие, оказываемое этими излучениями на самые разные объекты. Влияние оказывается на растительные и животные объекты, в том числе на развитие и продолжительность жизни дрозофилы, на деление клеток (нормальных и опухолевых), на биохимические показатели крови крыс и мышей и другие органы. Влияние оказывают как микроволновые, так и рентгеновские импульсы и эффект зависит от частоты повторения импульсов. Наиболее эффективно действуют излучения с частотой повторения импульсов в пределах от единиц до нескольких десятков Гц. Вероятнее всего, эксплуатация генераторов такого излучения будет сопровождаться неблагоприятным для окружающей среды и для обслуживающего персонала влиянием, характер которого пока не вполне ясен и экологическими или санитарно-гигиеническими нормативами не регламентирован.

Таким образом, в рамках электромагнитной экологии можно выделить следующие проблемы: 1) разработка экологических нормативов безопасного действия радиочастотных ЭМИ с учётом большей опасности модулированных излучений; 2) с регламентация пользования сотовыми телефонами; 3) с разработка экологических и гигиенических нормативов безопасных уровней для мощных импульсных ЭМИ с импульсами субмикросекундной и наносекундной длительности.

Решение указанных проблем в настоящее время является актуальным. Радиочастотные излучения представляют реальную экологическую опасность.

- ЭМИ и ЭМП действуют постоянно и практически на всё население, включая детей и юношей, женщин разного возраста, в том числе и беременных, больных людей;

- уровень электромагнитного загрязнения непрерывно растёт;

- существенную неопределённость в оценку опасности вносит наличие модуляции.

На основании этого РНКЗНИ считает необходимым в самое ближайшее время сосредоточить внимание на следующих направлениях:

- на исследовании роли модуляции в формировании биоэффектов в условиях воздействия ЭМИ низких уровней;

- на эпидемиологическом исследовании отдалённых последствий облучения;

- на оценке влияния различных факторов среды при формировании биологических эффектов ЭМИ;

- на совершенствовании методов дозиметрии и электромагнитного мониторинга.

Контрольные вопросы.

1. Какие проблемы электромагнитной экологии существуют в настоящий момент времени?

2. В чём заключается проблема активного использования сотовых телефонов?
3. Что является источником электромагнитного загрязнения при работе системы сотовой связи?
4. Значение рекомендаций, принятых Восьмой сессией Конгресса местных и региональных властей Европы?
5. Каковы должны быть ограничения при пользовании аппаратами сотовой связи?
6. В чём заключается предупредительный принцип в подходе к оценке и устранению неблагоприятного действия ЭМИ?
7. В чём заключается особенность биологического действия новых источников импульсного ЭМИ?
8. Какие направления в оценке биологического и экологического действия ЭМИ актуальны?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие средств и систем коммуникации, радиолокации, радионавигации, передача электроэнергии на большие расстояния, широкое использование электромагнитных приборов в быту привели к значительному (во многие тысячи раз) увеличению электромагнитного фона планеты. Тенденция к нарастанию техногенного электромагнитного фона Земли, ставшего электромагнитным загрязняющим фактором, сохраняется во всём частотном диапазоне от 0 до 10^{11} Гц в связи с интенсивным развитием компьютерной техники и систем охранной сигнализации, телевидения и мобильной связи, в особенности сотовой телефонии.

Анализ имеющихся научных данных позволяет выделить характерные особенности экологического плана, сформировавшиеся за последние 70 лет нарастания масштабов электромагнитной сферы. Во-первых, значительное повышение уровней ЭМП и ЭМИ во всём частотном диапазоне электромагнитных колебаний с максимальной концентрацией в районах с промышленной деятельностью и электронными средствами передачи информации. Следовательно, произошло «зашумление» естественных электромагнитных геофизических источников сигналов или информации, оказывающих регулирующее влияние на формирование или поддержание биоритмических процессов в биосфере. Во-вторых, это появление новых глобальных для всей планеты источников промышленных частот 50 – 60 Гц, которые в силу своих физических особенностей оказывают влияние на функционирование живых систем на всех уровнях организации, от молекулярного до биосферного. Экологические последствия возникновения нового антропогенного синхронизирующего электромагнитного фактора практически не прогнозируемы на современном научном уровне, но в его потенциальной опасности при хроническом действии для живой природы и человека не приходится сомневаться. В-третьих, многократное, в тысячи раз увеличение интенсивности электромагнитного фона высокочастотной части спектра: в радиоволновом, мегагерцовом и гигагерцовом диапазонах. Поскольку вся эволюция живых организмов проходила при доминирующих

вариациях низкочастотных компонент спектра геомагнитного поля, то значительное, пока не ограниченное увеличение высокочастотной составляющей ГМП, как локальное, так и глобальное, может иметь не предсказуемые эволюционные, психогенные и прочие последствия. В четвёртых, сочетанное, в комплексе с другими антропогенными факторами, влияние ЭМП и ЭМИ, вероятно, так же приводит к негативным экологическим последствиям, прежде всего для человека. Следовательно, за последние 70 лет сформировался новый экологический фактор – антропогенные ЭМП и ЭМИ. Значительное увеличение их локальной интенсивности, глобальность распространения, биологическая эффективность – всё это пока позволяет рассматривать техногенную электромагнитную сферу в качестве эволюционной компоненты с не прогнозируемыми и далеко идущими последствиями.

По мнению академика А. Яблокова, ситуация с электромагнитным загрязнением среды должна быть поставлена под контроль органов государственной власти, о чём свидетельствует рекомендательное письмо администрации президента РФ от 6 сентября 1995 г. И постановление правительства РФ №997 от 13 августа 1996 г.

Современные гигиенические нормы, установленные для всего диапазона частот ЭМП и ЭМИ, достаточно хорошо регламентируют условия производственной деятельности человека и условия пребывания на солитебных территориях. Однако, в современных нормативах не учитываются используемые режимы модуляции излучений при любых видах воздействия на живые системы, не рассмотрены эффекты хронического действия ЭМП и ЭМИ в онтогенезе животных и человека, сочетанного влияния ЭМИ нескольких частотных диапазонов и сочетанного действия ЭМИ с другими загрязняющими факторами – химическими, шумами, вибрацией, повышенной температурой. Авторами настоящего учебного пособия показано, что электрическое поле ЛЭП-500 вызывает более выраженные биологические изменения при наличии дополнительных

загрязнений окружающей среды а импульсно модулированное радиочастотное ЭМИ на фоне повышенной температуры делает более сильной зависимость биологического эффекта от частоты модуляции. Что касается экологического нормирования ЭМП И ЭМИ, то в данной области, во-первых, отсутствует концепция экологического подхода к решению существующей проблемы, а простой перенос гигиенических нормативов в экологическое нормирование без учёта экологических особенностей различного рода биоценозов представляется не эффективным. Во-вторых, ни в России, за исключением Томской школы электромагнитобиологии (Г.Ф. Плеханов, 1990; В.М. Орлов, 1991; А.Г. Карташев, 2000), ни в СНГ, ни за рубежом в течение последних 15 лет не проводились комплексные эколого-физиологические исследования в области электромагнитной экологии. Представляется целесообразным проведение научных исследований экологической значимости ЭМП и ЭМИ, и разработки научно обоснованных экологических нормативов их безопасного действия, равно как обеспечения контроля за соблюдением безопасных уровней электромагнитного воздействия на живые системы и законодательного обеспечения его выполнения.

По-видимому, в реализации указанных задач заметную роль могут сыграть специалисты-экологи, имеющие хорошую подготовку по электромагнитной экологии. Фундаментальные знания, полученные в рамках спецкурса «Электромагнитная экология», позволят им в практической деятельности корректно, с помощью инструментальных методов или методов биомониторинга, оценивать электромагнитную обстановку, адекватно анализировать возможность экологической опасности, принять правильные организационные меры для её устранения, повысить электромагнитную безопасность на контролируемой территории. Они смогут профессионально-ответственно участвовать в законотворческой деятельности, устраняя существующие пробелы в законах, которые пока не обеспечивают в должной

мере экологической безопасности от электромагнитного загрязнения окружающей среды.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

БЛМ – бислойные липидные мембраны;
ВДУ – временные допустимые уровни;
ВОЗ – Всемирная организация здравоохранения;
ГМП – геомагнитное поле;
ДМВ – дециметровые волны;
ИМ ЭМИ – импульсно модулированное электромагнитное излучение;
КВЧ – крайне высокие частоты;
КПК – короткопериодические геомагнитные колебания;
ЛО – ложное облучение;
ЛЭП – линия электропередачи;
ЛЭП ЭВН – ЛЭП сверхвысоких напряжений (более 300 кВ);
МКВ – микроволны;
МП – магнитное поле;
Н – напряжённость магнитного поля;
НЧ, ВЧ – низкочастотные, высокочастотные;
ПД, ПП – потенциал покоя, потенциал действия;
ПДУ – предельно допустимые уровни;
ПМП – постоянное магнитное поле;
ПеМП – переменное магнитное поле;
ППР – процент прерванного развития;
ППЭ – плотность потока энергии;
ПЭП – постоянное электрическое поле;
Е – напряжённость электрического поля;
ПеЭП – переменное электрическое поле;
РНКЗНИ – Российский национальный комитет по защите от неионизирующих излучений;
РЛС – радиолокационные станции;
СанПиН – санитарные правила и нормы;
СЭМП – статические электромагнитные поля;
СВЧ – сверхвысокие частоты;
УВЧ – ультравысокие частоты;
УПМ – удельная поглощённая мощность;
ЦНС – центральная нервная система;
ЭА – электрическая активность;
ЭМИ РЧ – электромагнитное излучение радиочастотного диапазона;
ЭМП – электромагнитное поле;
ЭКГ – электрокардиограмма;
ЭЭГ – электроэнцефаллограмма.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Бецкий О.В., Голант М.Б., Девятков Н.Д. Миллиметровые волны в биологии и медицине. М: Знание, 1988, - 94 с.
- Бинги В.Н. Магнитобиология эксперименты и модели. М., Милта, 2002, 592 с.
- Биогенный магнетит и магниторецепция. Под ред. Дж.Киршвинка, Д. Джонса, Б. Мак-Фаддена. М., Мир, 1989. 353 с.
- Григорьев Ю.Г., Степанов В.С., Григорьев О.А., Меркулов А.В. Ефанов В.И., Тихомиров А.А. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем. Томск, ТУСУР, 2004, 298 с.
- Электромагнитная безопасность человека. Справочно-информационное издание. М: РНКЗНИ, 1999, - 145 с.
- Давыдов Б.И., Тихончук В.С., Антипов В.В. Биологическое действие, нормирование и защита от электромагнитных излучений. М: Энергоатомиздат, 1984,- 177 с.
- Девятков О.Д.- Успехи физических наук, 1973, т. 110, вып.3. с. 453- 454
- Карташев А.Г. Биоиндикация экологического состояния окружающей среды. Томск, «СКК-ПРЕСС», 1999, 192 с.
- Карташёв А.Г. Электромагнитная экология. Томск: изд. ТГУ, 2000, 275 с.
- Колесник А.Г., Колесник С.А., Побаченко С.В. Электромагнитная экология. Томск, ТМЛ-Пресс, 2009, 336 с.
- Орлов В.М. Насекомые в электрических полях. Томск, 1990, 110 с.
- Пиккарди Дж. Химические основы медицинской климатологии. М., Гидрометеиздат, 1967, 100 с.
- Плеханов Г.Ф. Основные закономерности низкочастотной электромагнитной биологии. Томск, ТГУ, 1990, 186 с.
- Пресман А.С. Электромагнитные поля и живая природа. М: Наука, 1990, 186 с.
- Протасевич Е.Т. Электромагнитное загрязнение окружающей среды. Учебное пособие. Томск: изд. ТПУ, 1995,- 52 с.

Протасов В.Р. и др., Введение в электроэкологию. М., Наука, 1982. 335 с.

СанПиН 2.2.4/2.1.8.055-96. Санитарные правила и нормы. Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона (ЭМИ РЧ). М: ГКСЭН, 1996

СанПиН 6-96. Санитарные правила и нормы защиты населения г. Москвы от электромагнитных полей передающих радиотехнических объектов. М: ЦГСЭН, 1996

Холодов Ю.А. Реакции нервной системы на электромагнитные поля. М: Наука, 1975, 207 с.

Электромагнитные поля и здоровье человека. / Под ред. Проф. Григорьева Ю.Г. М: изд. РУДН, 2002, - 178 с.

Электромагнитные поля и население. Современное состояние проблемы. / Под ред. проф. Григорьева Ю.Г. и Васина А.Л. М: изд. РУДН, 2003, - 116 с.

Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М., Мысль, 1976, 366 с.