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

Е.Т. Протасевич

Электромагнитный фон и его влияние на человека

Учебное пособие

Издательство ТПУ
Томск 2004

УДК 537.63
П 83
Протасевич Е.Т.
П 83 Электромагнитный фон и его влияние на человека. Учебное пособие: – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 100 с.

В учебном пособии представлены общие сведения об электромагнитных полях, классификация компонентов электромагнитного фона, современные представления о физических полях биологических объектов и биологической активности электромагнитных волн. Раскрыты особенности распространения радиоволн ВЧ- и СВЧ-диапазонов внутри зданий, а также вопросы защиты персонала и населения от радиоволнового облучения.
Учебное пособие соответствует разделам учебных дисциплин «Экология» и «Безопасность жизнедеятельности», в которых рассматриваются вопросы защиты человека в рабочей зоне (защита персонала), в окружающей среде и вопросы защиты биосферы в целом. Предназначено для студентов, аспирантов, преподавателей и научных работников, а также для сотрудников отделов охраны труда, экологических отделов предприятий и организаций.

УДК 537.63

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Р е ц е н з е н т ы

Доктор физико-математических наук, профессор заведующий кафедрой радиофизики Томского государственного университета.
В.П. Якубов

Доктор физико-математических наук, профессор Томского государственного педагогического университета
В. И. Шишковский

© Томский политехнический университет, 2004
© Оформление. Издательство ТПУ, 2004
© Протасевич Е.Т., 2004

ВВЕДЕНИЕ

Под электромагнитным фоном следует понимать любое излучение радиочастотного диапазона длин волн, которое является характерным для данной местности или какого-либо помещения.

Необходимо отметить, что радиочастотный диапазон длин волн занимает промежуточное положение между статистическими полями (электрическими или магнитными) и инфракрасным диапазоном длин волн. По этой причине представленные материалы содержат санитарно-гигиенические нормативы воздействия различных полей (как статистических, так и электромагнитных), что позволяет обучаемому лучше ориентироваться при анализе электромагнитного «загрязнения» окружающей среды.

Цель настоящего учебного пособия – дать будущему специалисту истинную картину потенциальной опасности электромагнитного загрязнения среды и научить его самостоятельно сделать правильный выбор относительно возможности защиты от такого воздействия.

Необходимость появления данного пособия обусловлена относительно слабой информируемостью студентов и населения о причинах возникновения электромагнитного фона и последствиях его воздействия на человека.

Работа адресована в качестве пособия преподавателям и студентам, изучающим курс экологии, и может быть полезной учащимся и преподавателям школ, гимназий, лицеев, техникумов. Часть материала носит вводный, ознакомительный характер, что позволяет использовать пособие при подготовке специалистов и гуманитарного профиля.

В основу пособия положены преимущественно материалы автора, а также курс лекций, прочитанный им в ТПУ по дисциплине «Экология» в 1992–2004 гг.

I. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Из курса общей физики известно, что постоянное магнитное поле и постоянное электрическое поле могут существовать независимо одно от другого и практически не взаимодействуют между собой. Однако, как только эти поля начинают изменяться (по величине или по направлению), то обнаруживается между ними тесная взаимосвязь, которая описывается известными уравнениями Максвелла. Напомним их вид:

$$rot\boldsymbol{H} = \boldsymbol{j} + \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial t}, \qquad rot\boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t};$$
$$div\boldsymbol{D} = \rho, \qquad div\boldsymbol{B} = 0. \tag{1}$$

В уравнениях Максвелла для электромагнитного поля влияние вещества учитывается при помощи величин ε, μ и σ, которые определяются опытным путём и входят в уравнение состояния:

$$\begin{aligned} &\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \mathbf{E}, \\ &\mathbf{j} = \sigma \cdot \mathbf{E} + \mathbf{j}_{стр}, \\ &\mathbf{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \mathbf{H}. \end{aligned} \tag{2}$$

В вакууме электромагнитное поле характеризуется напряжённостью электрического поля $\boldsymbol{E}$ и магнитной индукцией $\boldsymbol{B}$, то есть векторными величинами, зависящими от пространства координат и времени. Эти величины определяют силы, действующие со стороны поля, их заряды и токи, распределение которых в пространстве задаётся плотностью заряда ρ и плотностью электрического тока $\boldsymbol{j}$. Для описания электромагнитных процессов в материальной среде в уравнения Максвелла введены вспомогательные векторные величины, зависящие от состояния и свойств среды, – электрическая индукция $\boldsymbol{D}$ и напряжённость электрического поля $\boldsymbol{H}$.

Отметим, что ε – диэлектрическая проницаемость, а μ – магнитная проницаемость среды (индекс нуль относится к их абсолютным значениям, а отсутствие индекса – к относительным величинам), σ – удельная электропроводность, $\boldsymbol{j}_{стр}$ – плотность так называемых сторонних токов, т.е. токов, поддерживаемых любыми силами, кроме сил электрического поля (например, магнитным полем, диффузией).

Взаимосвязь электрических и магнитных полей, выражаемая уравнениями Максвелла, определяет волновой характер их изменения в пространстве и во времени. Приведённые уравнения имеют достаточно простой физический смысл. Согласно закону Био-Савара-Лапласа, вокруг проводника с током образуется магнитное поле с замкнутыми силовыми линиями (вихревое поле). При этом переменному току будет соответствовать и переменное магнитное поле и наоборот. Математическое уравнение, выражающее закономерность возникновения магнитного поля при изменении смещения электрического поля, описывается первым уравнением Максвелла. Согласно закону электромагнитной индукции, вследствие изменения во времени индукции магнитного поля, в каждой точке пространства образуется вихревое электрическое поле. Этот процесс принято описывать в виде математического выражения, которое известно как второе уравнение Максвелла.

Совокупность переменных электрических и магнитных полей, неразрывно связанных друг с другом, называют электромагнитным полем. Эта связь выражается в том, что всякое изменение во времени магнитного поля вызывает появление электрического поля и, с другой стороны, всякое изменение во времени электрического поля вызывает появление магнитного поля. Тогда, по аналогии с предыдущим определением, электромагнитная волна – это взаимосвязанное распространение в пространстве изменяющихся электрического и магнитного полей.

Электромагнитная волна обладает энергией и её распространение в пространстве связано с переносом энергии. Эта энергия может переходить в любой известный нам вид энергии.

Под распространением электромагнитной волны понимается процесс переноса электромагнитной энергии в форме энергии электрического и магнитного полей. В процессе распространения электромагнитной волны направление электрического поля перпендикулярно к направлению магнитного поля, а направление распространения волны (и переноса энергии) перпендикулярно к направлению обоих полей.

В большинстве случаев любой изменяющийся во времени процесс можно представить в виде совокупности простых гармонических колебаний, на которые может быть разложен этот колебательный процесс. Таким образом, любые сложные электромагнитные поля могут быть тоже представлены в виде простейших синусоидальных составляющих, которые принято также называть электромагнитными волнами (колебаниями). Для более глубокого понимания рассмотрим этот вопрос подробнее.

Из курса математики известно, что действительная функция *f(t)*, для которой существует интеграл

$$\int_{-T/2}^{T/2} |f(\tau)|\, d\tau,$$

может быть записана в виде разложения в ряд Фурье, представляющего собой бесконечный тригонометрический ряд.

$$\frac{1}{2}\alpha_o + \sum_{k=1}^{\infty}(\alpha_k \cos k\omega_o t + b_k \sin k\omega_o t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k e^{ik\omega_o t}, \qquad (3)$$

где $\omega_o = \dfrac{2\pi}{T}$, а

$$C_k = C_{-k} = \frac{1}{2}(\alpha_k - ib_k) = \frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2} f(\tau) e^{-ik\omega_o t} d\tau. \qquad (4)$$

Здесь $\frac{\alpha_o}{2}$ – постоянная составляющая (среднее значение); α_k и b_k – амплитуды косинусоидальных и синусоидальных членов разложения f(t); k – целые числа.

Это обстоятельство позволяет проводить гармонический анализ любой непериодической функции (см. рис. 1).

В качестве последней может быть, например, импульс тока разряда линейной молнии. Разложение Фурье позволяет представить такой непериодический процесс в виде суммы периодических гармонических составляющих. Отсюда становится понятным, почему разряд обычной молнии или электрическая сварка вызывает помехи при приёме телевизионного сигнала или работе сотовой связи.

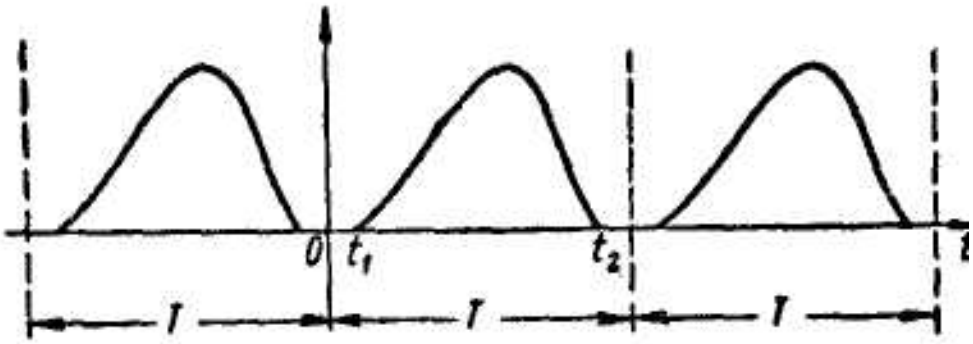


Рис. 1. Представление непериодической функции (в центре рисунка) в периодическую последовательность для дальнейшего разложения в ряд Фурье

Одной из основных характеристик электромагнитной волны является частота *f*. Под частотой принято понимать количество колебаний, которые совершаются в 1 секунду. Измеряется частота в герцах (Гц), и своему названию обязана немецкому физику Г. Герцу, впервые открывшему экспериментальным путём электромагнитные волны в 1888 году. (Любопытно, что свои опыты Г. Герц, будучи человеком верующим, ставил для того, чтобы установить контакт с Богом). Кроме частоты для описания колебательного процесса применяют следующие характеристики: период колебаний *T*, равный интервалу времени между двумя одинаковыми фазами колебаний и измеряемый в секундах, и длина волны λ, равная расстоянию, на которое распространяется волна за один период. Все перечисленные величины связаны между собой простыми соотношениями:

$$f = \frac{1}{T}; \qquad \lambda = cT = \frac{c}{f}, \tag{5}$$

где c=3·10^8 м/с – скорость распространения электромагнитной волны в воздухе, равная скорости света. В оптическом диапазоне длин волн частота обозначается обычно буквой ν.

Условно весь спектр электромагнитных волн принято разбивать на отдельные диапазоны, характеризующиеся примерно одинаковыми условиями распространения волн. Наиболее важным является такое деление всего спектра на две части – по принципу преобладания волновых или корпускулярных свойств. В основе разграничения лежит взаимосвязь между величинами $h\nu$ и kT (здесь h – постоянная Планка, ν – частота, k – постоянная Больцмана и T – температура в градусах Кельвина). Если $h\nu > kT$, то у электромагнитного поля преобладают корпускулярные свойства, и эта часть спектра обычно называется электромагнитным излучением. При $h\nu > kT$ у поля наблюдается преобладание волновых свойств, и для части спектра более применим термин электромагнитное поле. На границе такого условного деления спектра, когда $h\nu = kT$, частота излучения ν=6·10^{12} Гц (λ = 50 мкм) при температуре, равной 20ºС. Более подробная классификация электромагнитных волн приведена в табл. 1.

Таблица 1

Виды электромагнитных волн

Наименование электромагнитных волн	Частота, Гц	Длина волны, м
1	2	3
Длинные	1–10^4	3·10^8–3·10^4
Радиоволны	10^4–3^{10}	3·10^4–10^{-2}
Инфракрасные	3·10^{10}–4·10^{14}	10^{-2}–7,5·10^{-7}
Световые	4·10^{14}–7,5·10^{14}	7,5^{-7}–4·10^{-7}
Ультрафиолетовые	7,5·10^{14}–7,5·10^{16}	4·10^{-7}–4·10^{-9}
Рентгеновские	7,5·10^{16}–2·10^{19}	4·10^{-9}–1,5·10^{-11}
Гамма	2·10^{19}–10^{21}	1,5·10^{-11}–3·10^{-13}
Космические	10^{21} и выше	5·10^{-14} и меньше

Однако, для практических целей и радиочастотный спектр тоже разбивается дополнительно на отдельные диапазоны, в каждом из которых свойства и условия распространения электромагнитных волн оказываются примерно одинаковыми. Мы не будем останавливаться на этом делении радиоспектра, поскольку из приведённых далее таблиц

легко можно получить представления о наименованиях диапазонов электромагнитных волн радиоспектра и тех условных границах, к которым они принадлежат. Отметим лишь, что сверхвысокими частотами (СВЧ) обозначается область спектра, колебания которых f>30 МГц, и в зависимости от длины волны в диапазоне СВЧ выделяют дециметровые, сантиметровые и миллиметровые волны.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА КАК ИСТОЧНИКА ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

В общем случае электромагнитный фон по своему происхождению можно разделить на природный и техногенный. В какой-то мере такое деление является условным. Из дальнейшего изложения будет видно, что часть природного электромагнитного фона всё-таки обусловлена хозяйственной деятельностью человека. Строго говоря, сюда нужно ещё добавить и космическое радиоизлучение. Однако его величина и характеристики не зависят от деятельности человека. По этой причине космическое излучение не является предметом нашего рассмотрения.

2.1. ПРИРОДНЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН

Природный электромагнитный фон может иметь атмосферное либо литосферное происхождение. Остановимся на этом вопросе чуть подробнее. Рассмотрение начнём с атмосферного электромагнитного фона.

Для атмосферы характерны следующие виды излучений:

а) интенсивное излучение при грозовых разрядах (его частота и длительность зависят от величины и длительности разрядного тока); это так называемые «атмосферики» (см. рис. 2, рис. 3);

б) предгрозовое радиоизлучение;

в) непрерывно-шумовое радиоизлучение грозовых облаков и циклонов (на частотах от сотен килогерц до сотен мегагерц).

Физическая природа двух последних видов излучений обусловлена, с одной стороны, их дроблением и коагуляцией (слиянием мелких капель в более крупные).

Излучают радиоволны и различные светящиеся объекты, возникающие в атмосфере и имеющие, как правило, плазменное происхождение: линейная молния, шаровая и чёточная молнии, огни «святого Эльма» и пр. Диапазон частот излучения плазменных объектов достаточно

широкий. Он лежит от нескольких МГц до 3 ГГц, то есть приходится на область высокой чувствительности биологической ткани.

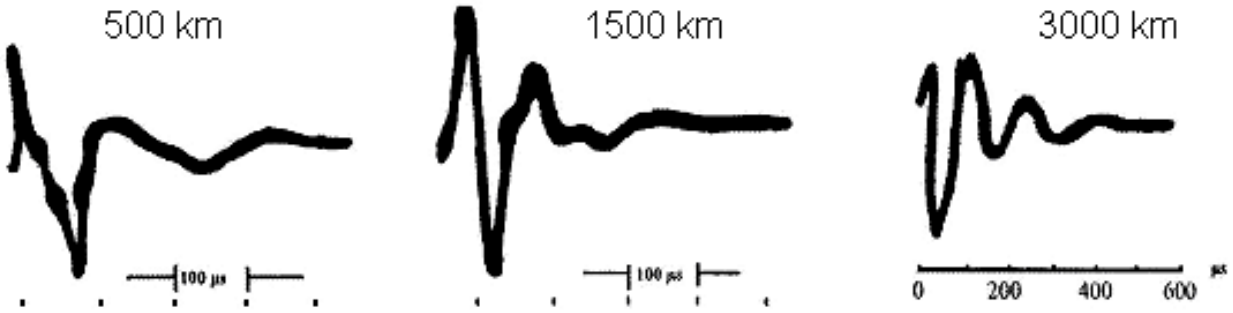


Рис. 2. Изменение формы атмосфериков в зависимости от расстоянии до грозового разряда: 1 – 500; 2 – 1500; 3 – 3000 км

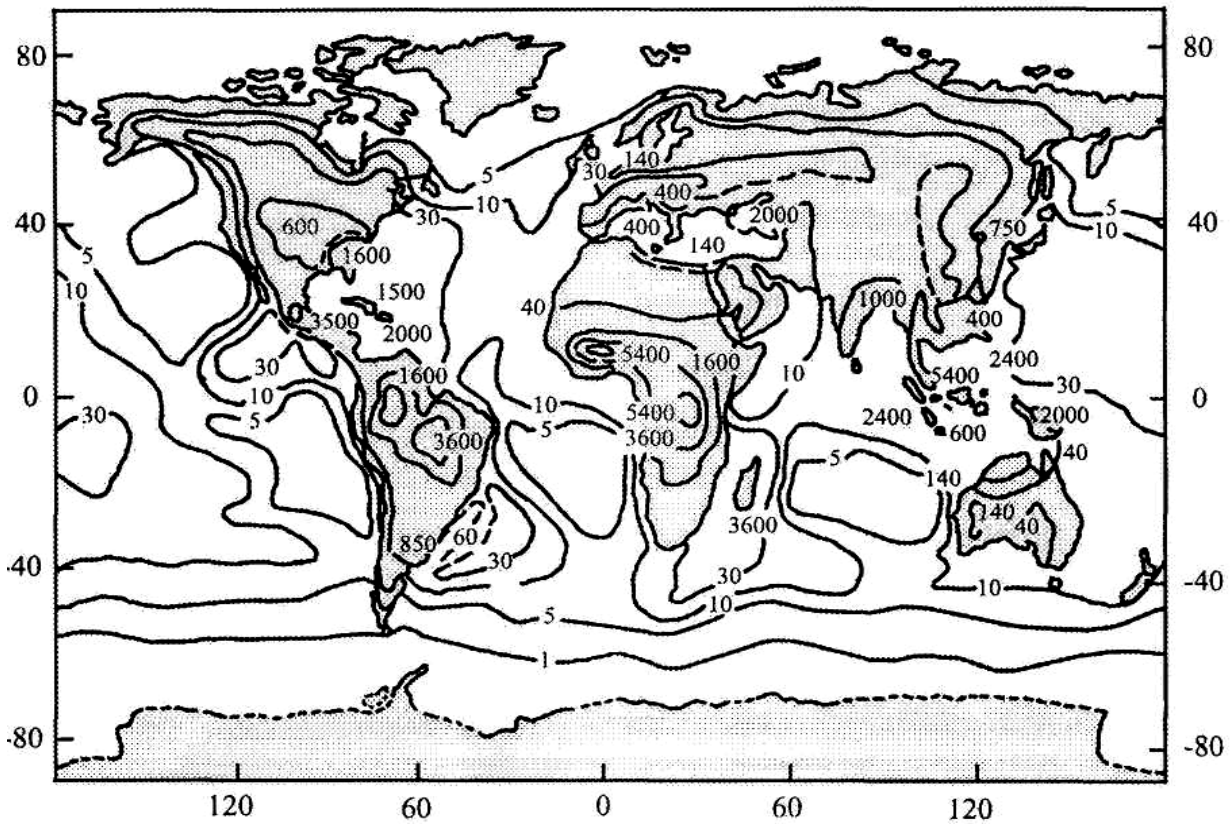


Рис. 3. Годовая плотность на квадратный километр суммарного распределения числа грозовых разрядов на земном шаре

В конце 50-х – начале 60-х годов прошлого столетия некоторые исследователи обратили внимание, что существует корреляция между геологической активностью земной коры и появлением естественного

электромагнитного фона. Такой вид радиоизлучения, который обусловлен действием геофизических факторов, будем называть литосферным. (Напомним, что литосферой в геологии называют верхний слой земной коры). Причина возникновения такого радиоизлучения долгое время оставалось точно не установленной. Регистрируется оно в полосе частот (0,1÷12,5) МГц и от 10 до ~ 100 Гц. Ряд исследователей, в частности, предполагают, что радиоизлучение литосферного происхождения обусловлено наличием пьезоэлектрического эффекта, возникающего за счёт появления механического напряжения горных пород. В этом случае протекающий ток генерирует электрическое поле, которое может привести к образованию дополнительного фона естественного происхождения. Наряду с приведённым существуют и другие объяснения причин генерации радиоизлучения из недр земли. Их рассмотрение выходит за рамки нашего изложения. Отметим лишь, что характеристики такого радиоизлучения зависят от состава горных пород и температуры, до которой они нагреты (например, при извержении вулканов). Некоторая информация по этому вопросу содержится в табл. 2.

Таблица 2

Связь между условиями проведения экспериментов и характером воздействия на минералы и горные породы и частотой радиоизлучения

№ п/п	Условия проведения эксперимента	Характер воздействия и вид образца	Частоты зарегистриро-ванного излучения	Полоса пропускания измерительной системы
1	2	3	4	5
1	Лабораторные	Растрескивание кристаллов LiF	До 1 МГц с максимумами на 5 и 100 кГц	–
2	Лабораторные	Растрескивание кристаллов LiF и KCl, минералов микрогаббро, долеритов, порфитов сланцев	Максимумы излучения (1÷10) кГц	–
3	Лабораторные	Разрушение гранитов и диорита	Максимумы излучения (2÷30) кГц	–
4	Лабораторные	Разрушение гранита, базальта, мрамора	≈ 1 кГц	–
5	Лабораторные	Разрушение образца гранита ударом	≈ 30 кГц	–
6	Лабораторные	Растрескивание и разрушение горных пород	десятки Гц десятки кГц	–

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
7	Натурные	Взрыв в поверхностных слоях земной коры, песчаный грунт	7÷12 кГц	–
8	Натурные	Взрыв в бокситовых рудах	9÷12 кГц	–
9	Натурные	Взрыв в бокситовых рудах	(0,5÷6,0) кГц и (10÷15) кГц	–
10	Натурные	Взрыв в скальном грунте	(5÷15) кГц	–
11	Лабораторные	Нагрев образцов горных пород до 1100°С	100кГц–2МГц с максимумом излучения на частоте ≈ 150 кГц для пегматита	220кГц÷30МГц 150кГц÷12МГц

Появление механических напряжений в горных породах обусловлено смещением тектонических плит, а также образованием пустот за счёт добычи в недрах земли полезных ископаемых или проведения подземных ядерных взрывов. Избыток же механической энергии может служить причиной «выброса» в окружающее пространство электромагнитного излучения. Из природных явлений, которые сопровождаются появлением сильного электромагнитного фона, следует указать также извержения вулканов, часто сопровождающиеся появлением огненных шаров.

Таким образом, из приведённого рассмотрения видно, что в природе излучает радиоволны практически всё, что окружает человека.

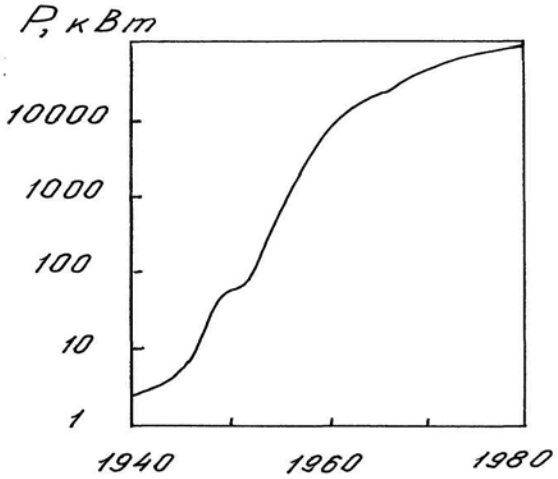
Электромагнитное излучение является одним из свойств материи. Излучает энергию и сам человек (мощностью приблизительно до 100 Вт), а также и другие биообъекты. В настоящее время поиску и изучению ЭМП, генерируемых различными биообъектами, посвящены многочисленные исследования, проводимые как в России, так и за её пределами.

2.2. ТЕХНОГЕННЫЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ФОН

Техногенный электромагнитный фон (или электромагнитный фон антропогенного происхождения) прямо или косвенно (как, например, при добыче полезных ископаемых) связан с деятельностью человека. Остановимся лишь только на первой возможности его появления.

Техногенный электромагнитный фон может быть как производственным, так и бытовым. Производственный ЭМ-фон, как правило, связан с какими-либо технологическими процессами: закалкой изделий токами высокой частоты, плазменной обработкой поверхности изделий пластмасс для улучшения адгезии и пр., а также наличием ВЧ-связи (радиопередатчики и локаторы аэропортов, речпортов и различных военных ведомств). Сюда же следует отнести сотовую связь и электромагнитные поля радиолокационных станций различных силовых ведомств), работающих преимущественно в сантиметровом и дециметровом диапазонах длин волн ($\lambda \sim 3$, 6, 10 см).

Бытовой ЭМ-фон обусловлен работой радио- и телепередатчиков, широким использованием СВЧ-печей и радиотелефонов. Некоторое представление о темпах увеличения суточной мощности радио- и телевизионных станций за последние полвека можно получить из рис. 4. Из данного рисунка следует, что за 50 лет суточная мощность радиоизлучения возросла более чем в 50 тысяч раз.



Годы

Рис. 4. Рост средней суточной мощности радио-телевизионных станций в послевоенный период времени (при рассмотрении не учитывалась мощность излучения радиолокационных станций, принадлежащих Министерству Обороны РФ, а также другим ведомствам и организациям, имеющим отношение к оборонной тематике)

Под электромагнитным загрязнением окружающей среды следует понимать такое состояние среды, когда техногенный электромагнитный фон равен или превышает природный ЭМ-фон, характерный для данной местности (или помещения).

В настоящее время на Земле возникли крупные электромагнитные «пятна», являющиеся порождением супергородов, которые полностью изменили «внешний геофизический облик» нашей планеты, и как след-

ствие этого, её светимость в радиодиапазоне длин волн превзошла светимость Солнца. На рис. 5 в качестве примера показан электромагнитный «портрет» города Новосибирска.

Необходимо отметить, что понятие «электромагнитное загрязнение окружающей среды» является сравнительно новым и не вся терминология, относящаяся к рассматриваемой сфере, принадлежит к числу устоявшейся. По этой причине для ясности изложения материала автор вынужден самостоятельно ввести ряд новых понятий. Одно из них уже приведено выше, часть других встретится позднее.

Некоторое представление распределения полей Томского телецентра можно получить из рисунков 6, 7.

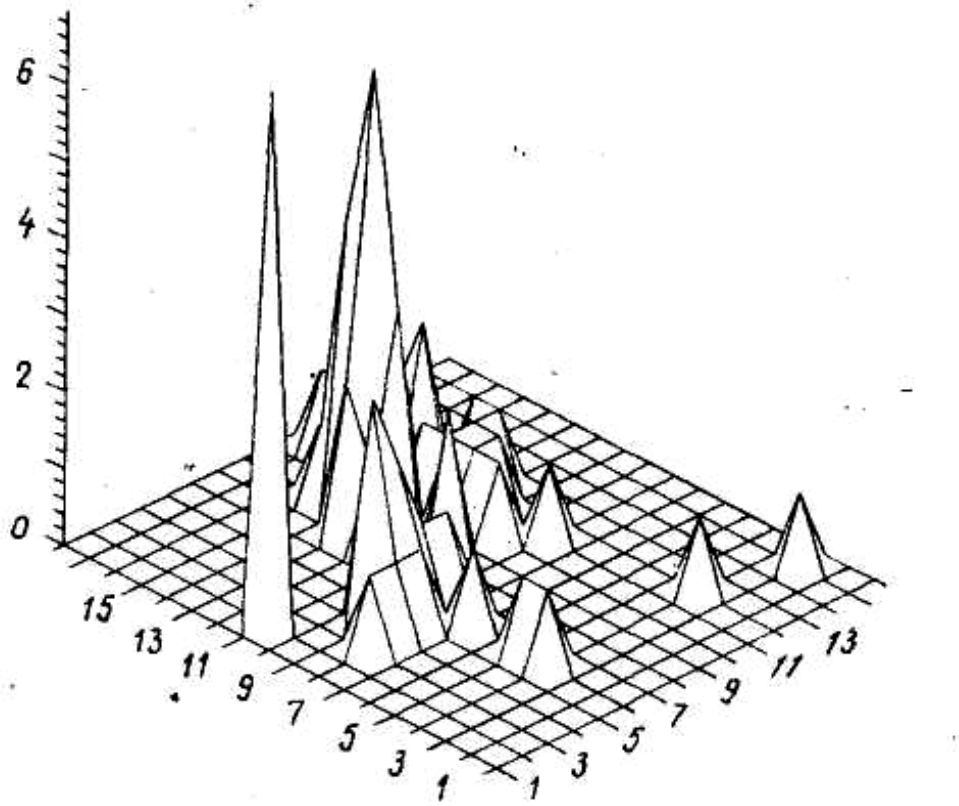


Рис. 5. Характер размещения аномальных светящихся образований над территорией города Новосибирска (по методу обратных расстояний)

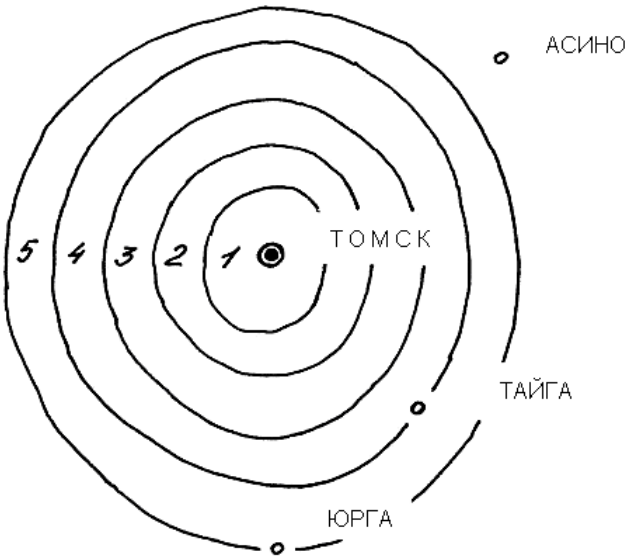


Рис. 6. Электромагнитный фон Томской области, создаваемый при работе УКВ-передатчика на несущей частоте 67,22 МГц. Цифрами 1, 2, 3, 4, 5 (здесь и далее) отмечены зоны, в которых средние значения напряжённостей электрических полей уменьшаются в пропорции 25:5:3:0,3:0,1

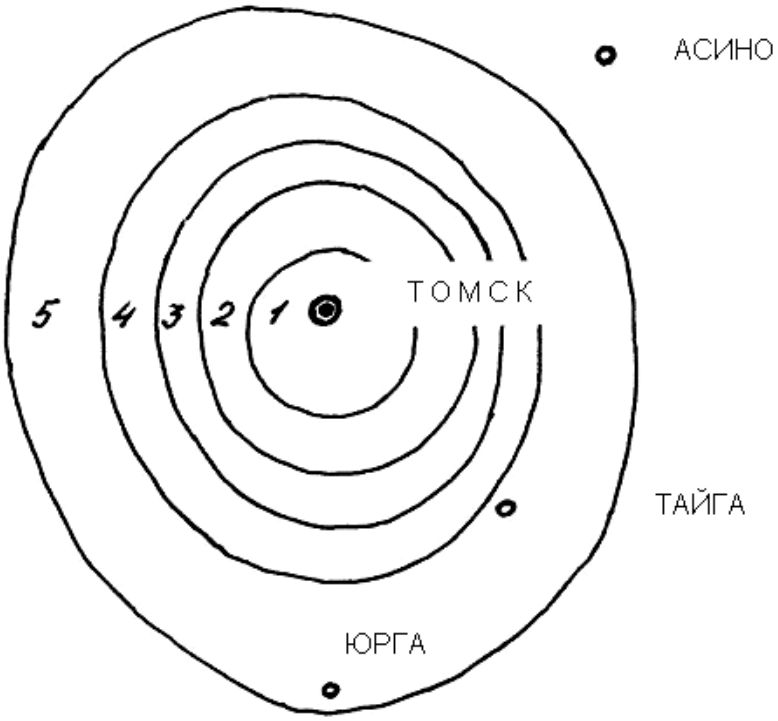


Рис. 7. Территориальное распределение напряжённостей электрического поля звукового канала телевизионного передатчика на частоте 56,25 МГц

Поскольку человек рождается и живёт в определённой электромагнитной среде, то в случае смены им места жительства (или условий пребывания), наряду с понятием «электромагнитное загрязнение» необходимо также говорить и об «электромагнитном голоде», который может возникнуть для человека как биологической системы. Другими словами, при рассмотрении проблемы, вынесенной в название пособия, целесообразно также говорить об «электромагнитном» комфорте или «дискомфорте» окружающей среды (производственных и жилых помещений, территорий зоны жилой застройки и т. д.). Из рис. 4 видно, что рост средней суточной мощности радио- и телевизионных станций на планете Земля с 1940 по 1980 гг. особенно заметным был с середины 50-х и до конца 70-х годов. Сейчас наблюдается его некоторое замедление. На рис. 8 представлена карта расположения на земном шаре 2200 телевизионных станций с эффективной мощностью, превышающей 50 кВт. Из приведённой карты видно, что наиболее сильные электромагнитные поля техногенного происхождения существуют в Западной Европе, Японии и США. Территория России в этом отношении является более благополучной.

Радиочастоты, разрешённые для работы радиотелефонов, составляют 30÷40 МГц и 890÷918 МГц, а для радиоудлинителей (разновидность радиотелефона) – 49 МГц. Частота радиосвязи в России – ориентировочно 170 МГц, резервная частота Министерства обороны – приблизительно 360 МГц, авиации – около 130 МГц и т. д. Другими словами, большинство рабочих частот различных ведомств можно идентифицировать и исключить из рассмотрения.

В табл. 3. приведены характеристики основных генераторов электромагнитного излучения, существующих сейчас на нашей планете, из которых следует, что диапазон используемых частот составляет от 27 МГц до 10 ГГц.

В табл. 4. приведены характеристики радиочастотных установок большой мощности, которые используются промышленностью для обеспечения различных технологий. Часть этого оборудования размещено на рабочих местах СХК, на которых предстоит работать будущим специалистам Томского политехнического университета.

Обратимся непосредственно к рассмотрению характеристик высокочастотных установок, которые используются для проведения плазменных исследований и разделения изотопов газофазными методами.

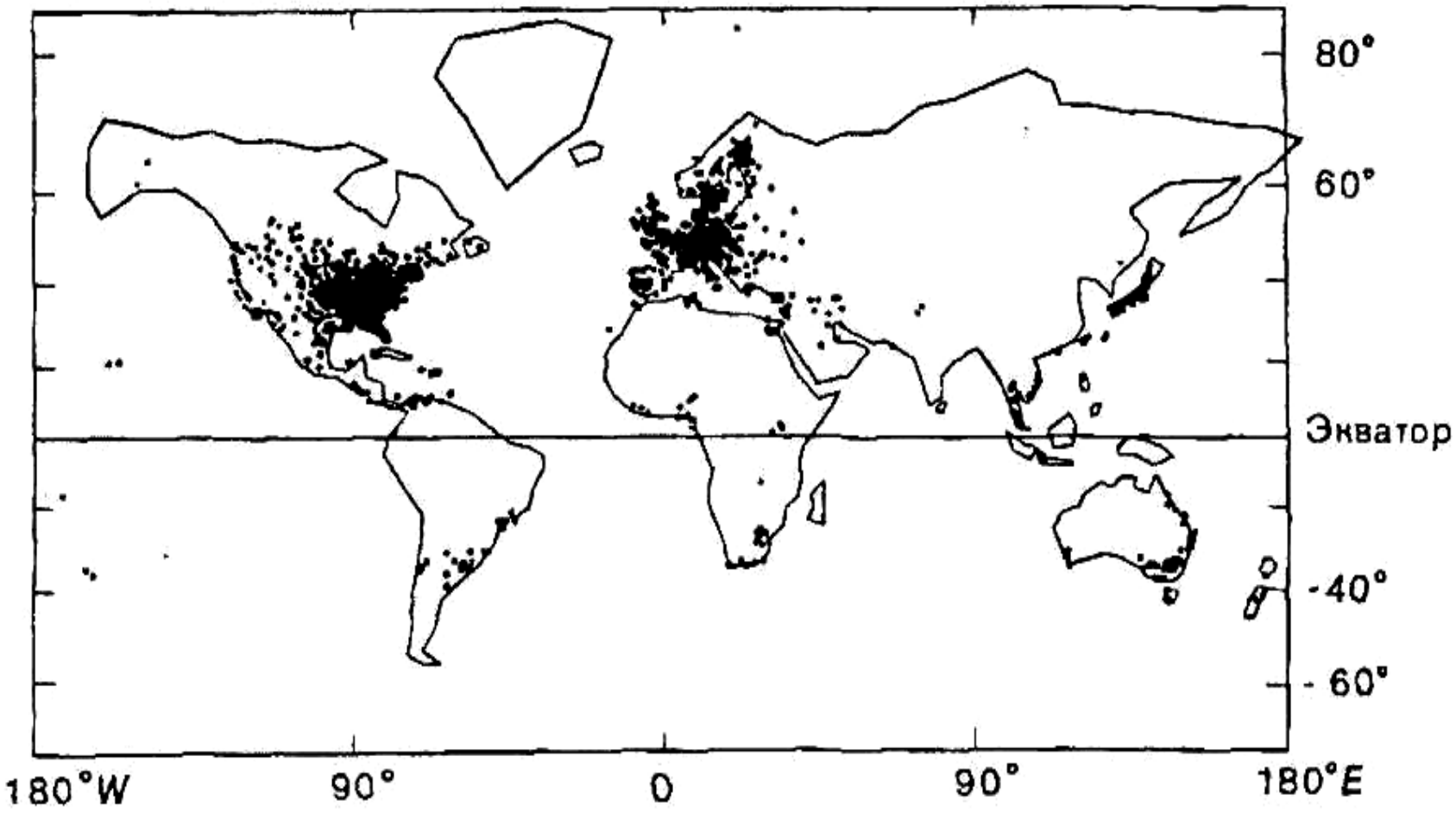


Рис. 8. Карта расположения 2200 телевизионных станций с эффективной излучаемой мощностью, превышающей 50 кВт. Передатчики частот различных ведомств можно идентифицировать и исключить из рассмотрения

Таблица 3

Оценки выходной мощности различных систем, работающих на частотах выше 20 МГц

Система	Диапазон частот, МГц	Число передатчиков	Доля времени, в течение которого передатчик работает	Средние параметры отдельного передатчика		Усреднённая по полосе частот* мощность излучения
				Максимальная эффективная мощность, Вт	Излучаемый диапазон частот, Гц	
Радиосредства диапазона частного пользования	27	10000000	0,01	5	2	200000
Специальные передвижные радиостанции	20-500	100000	0,1	20	1	200000
Метеорологические, морские и авиационные радиолокаторы	1000–10000	100000	0,01	10000 1000000 1000000		10 ÷ 1000
Военные радиолокаторы**	400	2	0,1	10000000000	0,1	20000000000
Радиостанции с частотной модуляцией	88–108	10000	1	4000	0,1	400000000
Телевизионные станции (передача изображения)	40–850	2000	1	5000000	0,1	10000000000

Примечание:* – *в последнем столбце указана мощность, генерируемая в полосе частот в расчёте на 1 Гц. Системы, работающие в более широкой полосе (чаще всего метеорологические, морские и авиационные радиолокаторы), излучают более высокую мощность на всех частотах, чем указано в этом столбце. В этой таблице приведены результаты работы W.Sullivan III, S. Brown, C. Wetherill. Science, 199,377.1978.*

*** Здесь приведены характеристики только самых мощных военных радиолокаторов, превосходящих по мощности все остальные системы этого типа.*

Таблица 4

Основные характеристики серийных изделий Ленинградского завода высокочастотных установок

Тип изделия	Мощ-ность		Питающая сеть			Частота рабочая номина-льная	Назна-чение	Рабо чее уст-рой-ство
	кВА	кВт	Напря-жение, В	Число фаз, ед.	Частота, Гц			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1. Установки высокочастотные								
ЛДГ-60М	105	63	380	3 с нулём	50	13,5±1,35 МГц	Нагрев диэлек-триков в поле вы-сокой частоты	Рабо-чий кон-ден-сатор (заво-дом не по-став-ляет-ся)
ВИЧ 10/0,44-ПТ-Л01	16	10	220/380 по заказу	3	50 / 50 или 60	440±11 кГц	Плавка в тигле и цент-робеж-ная от-ливка бюгель ных проте-зов	Печь ин-дук-ционная
ВЧИ 25/0,44-3П-Л01	43	25	380 по заказу	3 с нулём	50/50 или 60		Нагрев сталь-ных из-делий в поле вы-сокой частоты под по-верхно-стную закалку	Индук-тор (обра-зец)
ВЧИ 63/0,44-3П-Л01	105	63	380 по заказу		50/50 или 60			
ЛЗГ-67М			380 по заказу		50/50 или 60	$66^{+2,9}$ кГц		

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ВЧИ 63/5,28ИГ-Л01			380		50	5,28±0,13 МГц	Ионии-зация газа	
ВЧИ 63/0,066-3П-Л02-ТВ			по заказу		50 или 60	$66^{+2,9}_{-6,6}$ кГц	Нагрев стальных изделий высокой частоты под поверхностную закалку	
ВЧИ 2-100/0,066У 4								
ВЧИ 2-100/0,066У 4	165	100	380 по заказу	3 с нулём	50/50 или 60			
ВЧИ 3-160/0,066У 4	280	160	380		50		Питание технологических устройств индукционного нагрева деталей машин и инструмента при различных технологических операциях	
ВЧГ1-60/0,066	95	60			50			
ВЧГ 1-100/0,066	130	100						
ВЧГ2-60/0,44	80	60						
ВЧС1-400/0,44	630	400				440±11 кГц	Нагрев кромок трубной заготовки при сварке труб из чёрных и цветных металлов	Сварочное устройство
ВЧС1-630/0,44	960	630						

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
							и сплавов	
ВЧС 2-160/0,44 У4	260	160	380 по заказу	3 с нулём	50 или 60		Сварка оболочек кабеля	
ВЧС1-160/1,76			380 по заказу		50	1,76±0,44 МГц	Сварка оболочек кабеля	
2. Генераторы ультразвуковые								
УЗГ-10/1,6	3,0	1,6	380	3	50	18±1,35; 22±1,65	Питание пьезоэлектрических преобразователей	Примечание
УЗГ8-0,1/22	0,28	0,1	220	1	50	22±1,65 кГц	Источник питания ультразвуковых станков для обработки хрупких и твёрдых диэлектриков	
УЗГ5 – 1,6/22	4,2	1,6	220/380	3 с нулём	50	22±1,65 кГц		
3. Нагреватели индукционные								
Тип изделия	Цепи управления			Цепи повышенной частоты			Назначение нагревателя	Примечание
	Напряж., В	Число фаз	Частота, Гц	Мощность, кВт	Напряж., В	Частота, Гц		
КИН1-250/2,4							Сквозной нагрев концов заготовок	

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
							круглого сечения перед ковкой	
КИН2-250/2,4						2400	Сквозной нагрев мерных стальных заготовок перед пластической деформацией	
КИН5-250/2,4КУ4	220	1	50	250	800			
КИН6-250/10КУ4						10000		
КИН1-500/1КУ4				500		1000		
КИН2-500/2,4КУ4						2400		
КИН2-750/1КУ4				750		1000		
КИН3-750/2,4КУ4						2400		
КИН3-150/10	380/220			150	750	10000	Нагрев концов стальных заготовок круглого сечения перед пластичес-	
КИН4-150/10								
КИН3-250/1				250		1000		
КИН4-250/1								

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
							кой деформацией	
КИН1-1500/1				1500			Нагрев стальных заготовок перед ковкой и штамповкой	
ИН-1502 П-шаг					1500	2400	Нагрев мерных заготовок прямоугольного сечения	
ИК1-500/1				500	800	1000	Нагрев мерных стальных заготовок перед пластической деформацией	
ИК1-800/1				800			Питание индукционных нагревателей	
СЧГ1-2*800/1	380	3 с нулём		1600	6 или 10кВ			

Из табл. 4 следует, что высокочастотная мощность этих устройств, изготовляемых ленинградским заводом токов высокой частоты, приближается к 50 кВт, а частотный диапазон находится в пределах от 1000 Гц до 13,1 МГц. Необходимо отметить, что технологические установки такого класса изготовляются и в других странах.

Существует ещё ряд областей широкого использования микроволнового излучения сантиметрового и дециметрового диапазона длин волн. Это прежде всего сушка изделий, в частности древесины, и приготовление пищи. Отметим лишь, что это излучение является более изо-

тропным и быстро рассеивается практически внутри помещений, где оно используется.

Что касается устройства и принципа действия систем космической и сотовой связи, то они будут рассмотрены в следующем разделе.

Мощный электромагнитный импульс возникает также при испытании или применении ядерного оружия или катастрофах техногенного характера на атомных электростанциях. При взрыве ядерного заряда образуется электромагнитное поле, которое вызывает наведённые электрические токи и напряжения в проводах, кабелях, антеннах радиостанций, электропроводящих коммуникациях. Одновременно излучаются радиоволны, распространяющиеся на большие расстояния. Радиоволны воспринимаются аппаратурой как помехи.

Электромагнитные поля в диапазоне радиочастот возникают в результате физических процессов, происходящих в момент взрыва. С точки зрения поражающего действия наибольшую опасность представляют импульсные электромагнитные поля, существующие несколько десятков миллисекунд. Эти электромагнитные поля принято называть электромагнитным импульсом (ЭМИ) ядерного взрыва.

При наземном ядерном взрыве гамма-кванты, исходящие из зоны ядерной реакции, и гамма-кванты, возникающие в результате захвата нейтронов ядрами атомов азота, выбивают из атомов воздуха быстрые электроны, которые летят в том же направлении, что и гамма-кванты, со скоростью света, а положительные ионы остаются на месте. В результате разделения положительных и отрицательных зарядов из образующихся элементарных электрических и магнитных полей возникает результирующее электромагнитное поле.

Электромагнитные поля, создаваемые ядерным взрывом, характеризуются напряжённостью. Время действия ЭМИ около 200 мс, спектр частот – от единиц до сотен мегагерц. По поражающему действию более опасны импульсы низких частот (10–15 кГц). ЭМИ наводит высокое напряжение, которое выводит из строя линии электроснабжения, нарушает изоляцию, расплавляет провода, выжигает элементы электросхем, вызывает ионизацию диэлектриков, может воспламенить аппаратуру, а через неё и здания, в которых она размещается.

При высотном ядерном взрыве ЭМИ возникает за счёт быстрых электронов, выбиваемых от рентгеновского излучения с атомами окружающей среды (атомами воздуха). Вследствие разделения положительных и отрицательных зарядов возникают сильные электромагнитные поля и излучения, достигающие поверхности земли. Электрические и магнитные поля ЭМИ характеризуются напряжённостью. И напряжён-

ность зависит от мощности взрыва, расстояния от его центра или эпицентра, вида взрыва, состояния окружающей среды и других факторов.

2.3. ЭКОЛОГИЧНОСТЬ СОТОВОЙ СВЯЗИ

В настоящее время сотовая связь получила широкое распространение в мире и есть все основания полагать, что ее использование будет охватывать все новые регионы. Однако большинство абонентов сотовой связи имеют слабое представление о принципе действия такой связи и о негативном влиянии радиоизлучения на их здоровье. Рассмотрению этих вопросов и посвящен настоящий раздел работы.

Сотовую связь обеспечивают три основных составляющих:

- базовые станции, являющиеся источником электромагнитного излучения;
- мобильные телефоны абонентов;
- радиорелейные станции, обеспечивающие обмен информации базовых станций между собой и функционирование всей сети в целом.

В принципе, каждая из трех перечисленных составляющих сотовой связи оказывают влияние на здоровье человека. Однако это влияние будет различным в зависимости от того, какое отношение имеет человек к сотовой связи и как долго ведет разговоры по сотовому телефону.

Частота излучения базовых станций составляет приблизительно 450 и 900 МГц, а мощность излучения – 5–200 Вт. Даже при самых благоприятных условиях распространения радиоволн дальность связи мобильного телефона с такой базовой станцией не превышает 20–30 км. Отсюда вытекает необходимость размещения базовых и радиорелейных станций непосредственно в населенных пунктах, то есть в местах наибольшей плотности пребывания абонентов (проживания населения). Для этой цели используются обычно господствующие высоты, в частности крыши высотных зданий, которые возвышаются над окружающей застройкой. Размещение базовых станций вне городской черты теряет смысл из-за низкой плотности населения Российской Федерации. При условии правильной эксплуатации излучателей базовые и радиорелейные станции могут размещаться на крышах как производственных, так и жилых зданий.

При хорошей экранировке блоков радиопередатчиков и фидеров таких станций электромагнитный фон не превышает доли микроватта (т. е. значительно ниже ПДУ, который составляет в России 10 мкВт/см^2) и не представляет опасности для здоровья как населения, так и обслуживающего персонала. Источниками опасности для здоровья являются лишь антенны базовых и радиорелейных станций. Для предотвращения

их негативного воздействия на здоровье населения устанавливаются санитарно-защитные зоны и зоны ограниченной застройки. Дадим сразу определения этих двух понятий.

Санитарно-защитной называют зону, в которой напряженность (или плотность потока мощности в СВЧ-диапазоне длин волн) электромагнитного поля превышает предельно допустимую. Нахождение людей внутри такой зоны считается опасным для их здоровья.

Зона ограниченной застройки – это участок местности, на котором запрещается возведение жилых и административных зданий, которые возвышались бы над антенной с целью исключения вредного влияния электромагнитного излучения на проживающих или работающих в них людей.

Форма и размеры санитарно-защитных зон и зон ограниченной застройки определяются местом источников электромагнитного излучения в функционировании сотовой связи. Так, для базовых станций санитарно-защитная зона не предусмотрена, а зона ограниченной застройки – круговая, с радиусом от 23 до 58 м. При таком подходе обеспечивается надежная связь абонента с базовой станцией. Для радиорелейных станций санитарно-защитная зона и зона ограниченной застройки имеют форму узких секторов шириной 2–3 градуса, которые ориентированы по азимуту главного лепестка диаграммы направленности антенны. Протяженность таких зон не превышает 100 м.

Существуют также и другие возможности использования сотовой связи. Проект системы Inmarsat-P, называемый также проектом ICO (по имени компании ICO Global Communications, организованный Inmarsat и партнерами), предусматривает интеграцию услуг сетей мобильной спутниковой связи и сетей мобильной связи общего пользования (рис. 9). Такая интеграция осуществляется с помощью узлов доступа к спутникам Земли. Вызов с абонентского терминала Inmarsat-P происходит через космический аппарат Inmarsat-P на другой абонентский терминал или на узел доступа – в сеть мобильной или фиксированной связи.

На начальном этапе работы планируется использование полосы частот в 10 МГц в каждом из направлений на линиях «вверх» и «вниз». В дальнейшем планируется увеличения полосы частот до 30 МГц в каждом из направлений. Связь между абонентским терминалом и космическим аппаратом будет осуществляться в полосах частот 1980 – 2010 МГц (с возможным разрешением полосы до 2170 – 2010 МГц), которые специально выделены на ВРК-95 в Женеве для мобильной спутниковой связи.

Более подробное описание системы Inmarsat-P выходит за рамки нашего описания. Отметим лишь, что система была введена в эксплуа-

тацию в конце 2000 г. Система Inmarsat-P была разработана с учетом требований, чтобы абонентский терминал соответствовал требованиям обеспечения безопасности при работе с электромагнитным излучением (средняя мощность абонентского терминала не превышает 0,25 Вт). По мнению специалистов, базовые и радиорелейные специалисты не представляют опасности для здоровья населения, поскольку ПДУ установлены с большим запасом, а размеры защитных зон малы и вероятность пребывания в них человека также мала.

Наибольшую опасность для здоровья человека представляют трубки мобильных телефонов. Максимальная мощность излучения большинства таких трубок составляет приблизительно 1 Вт, или превышает эту величину. Тогда среднее расстояние от антенны телефона до головы абонента равно не более 5 см, мозг человека будет облучаться с плотностью потока мощности в 1 мВт/см², которая значительно превышает ПДУ в СВЧ-диапазоне длин волн. Необходимо вспомнить и еще одно важное обстоятельство: резонансная частота головного мозга составляет приблизительно 900 МГц. Следовательно, наибольшую опасность для здоровья абонента, пользующегося услугами сотовой связи, представляет непосредственно сама телефонная трубка (это утверждение справедливо и для различного рода радиоудлинителей), а что касается излучения сотовых и радиорелейных станций, то они для населения (абонентов) непосредственной опасности практически не представляют.

В настоящее время для определения степени опасности излучения средств мобильной связи применяется ГОСТ 12.1.006–84, разработанный в СССР еще в 1984 году. В указанном ГОСТе изложена методика определения безопасного уровня электромагнитного облучения человека в зависимости от продолжительности воздействия. В табл. 5 и 6 приведены результаты измерений уровней излучений для различных моделей сотовых телефонов стандарта NMT и GSM на расстоянии 5 см от антенны. При паспортных значениях мощности, эти величины составили 320–600 мкВт/см² и 40–125 мкВт/см², соответственно. Приведенные цифры значительно превышают ПДУ. Однако необходимо отметить, что абонент пользуется телефоном не круглые сутки. По этой причине негативное воздействие электромагнитного излучения на человека можно в значительной степени избежать, если использовать радиотелефон стандарта NMT не более 40 минут в сутки, а аппарат стандарта GSM – 120 минут в сутки. Более мощные значения времени эксплуатации телефонов различных марок можно определить, используя табл. 5 и 6. В России наиболее широкое распространение получили стандарты GSM-900 и GSM-1800.

В настоящее время известны две возможности снижения уровня облучения абонента:

- использование специальных чехлов, которые надеваются на радиотрубку;
- применение наружных антенн (в офисах или в автомобилях).

Специалисты Всемирной организации здравоохранения предлагают рассмотреть вопрос о будущем сотовой связи. Они считают, что необходимо разработать более строгие стандарты безопасности на основании данных, которые получены медиками. Мобильный телефон превратился в настоящий кошмар для людей, которые невольно страдают от последствий его использования в общественных местах. Навязчивое желание беспрестанно звонить по мобильному телефону – это новая форма психического расстройства. Такое повальное увлечение сотовой связью представляет собой вид агрессии по отношению к окружающим.

Современное общество вынуждено принимать меры защиты от требований телефонных абонентов сотовой связи, которые заключаются в просьбе отключить телефоны в ресторанах, в театрах, в авиатранспорте. Депутаты Госдумы РФ приняли решение не использовать радиотелефоны во время заседаний, чтобы снизить уровень шума в зале.

В некоторых Женевских ресторанах администрация просит посетителей либо отключить телефоны, либо оставлять их гардеробщику, который позовет клиента в случае срочного звонка. Просьбу выключить телефоны можно услышать в театрах перед началом спектаклей.

Международная ассоциация авиатранспорта еще весной 1993 г. значительно расширила список электронных приборов, запрещенных к использованию пассажирами в полетах. Разработанный ранее список пополнился видеоиграми, лазерными проигрывателями, радиотелефонами.

Это требование обусловлено необходимостью обеспечения безопасности полётов. Причина запрета состоит в том, что управление современных самолётов обеспечивается электроникой. Практика эксплуатации самолётов (особенно во время фаз взлёта и посадки) показывает, что электронные устройства пассажиров могут создавать помехи, которые влияют на работу электронного оборудования самолёта, поскольку многие операции по управлению самолётом, которые недавно совершались посредством механических передач, выполняются сегодня электроникой.

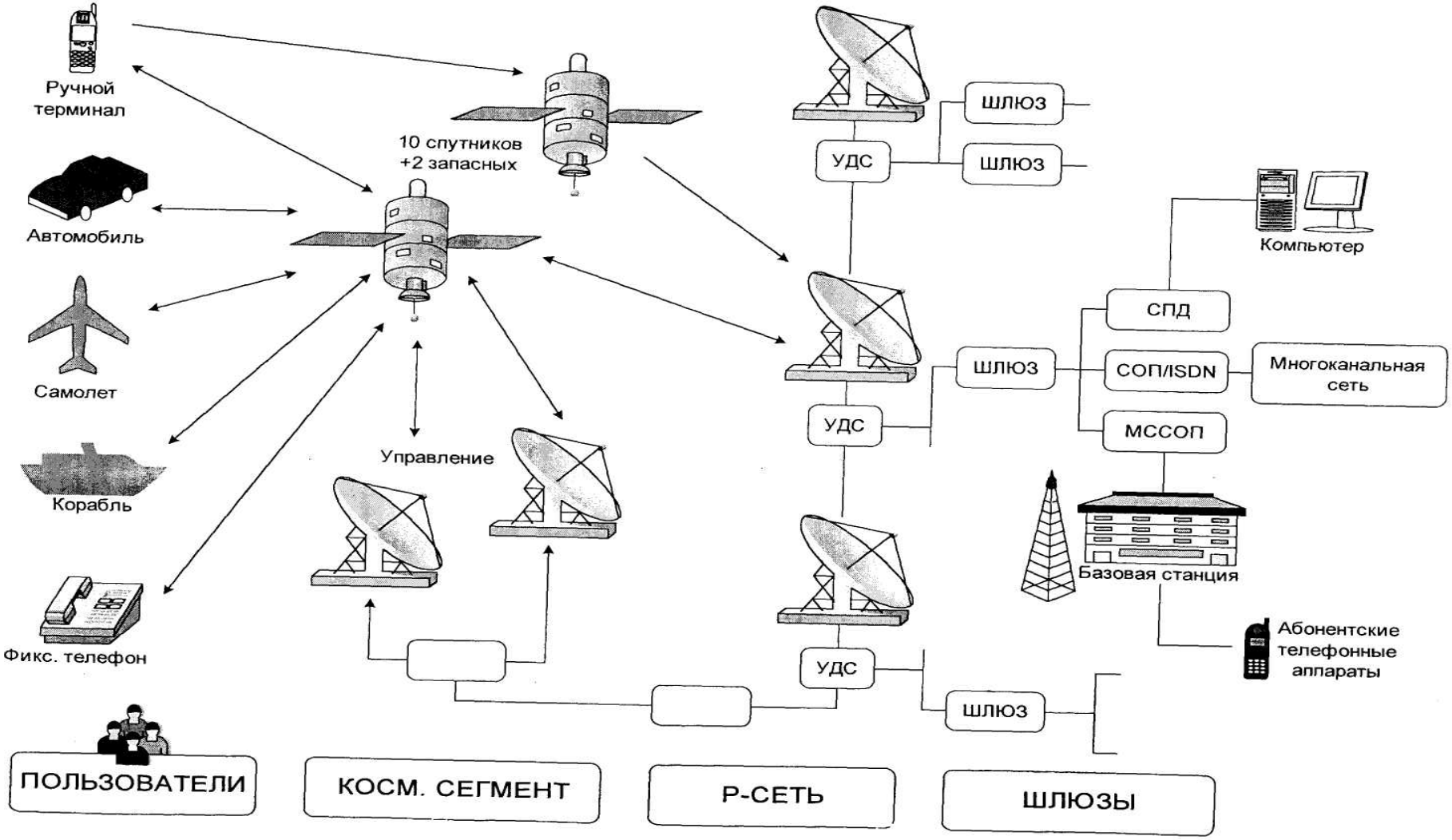


Рис. 9. Функциональная схема системы спутниковой связи Inmarsat-P(ICO)

Таблица 5

Результаты исследований электромагнитного излучения радиотелефонов сотовой связи стандарта NMT

Торговая марка	Обозначение	Мощность на входе антенны, Вт	Максимальный уровень излучения на расстоянии 5 см от антенны радиотелефона, мкВт/см^2	Допустимое время работы при нагрузке 200, мкВт*ч/см^2
Nokia 150	THF-2	1,315	478	0,42
Nokia 250	NHF-5XN	1,698	320	0,63
Nokia 350	THF-6	1,225	501	0,4
Nokia 440	THF-8	1,161	485	0,41
Nokia 450	THF-9	1,18	501	0,4
Nokia 550	THF-10	1,05	316	0,63
Nokia 720	THF-4SP	1,476	501	0,4
Nokia 10WLL	THF-4PP	5,152	708	0,28
Motorola Associate 2000	CCCN4052A	15,066	794	0,25
Maxan	HP-450i	1,0	630	0,32
Delux	MX-2450	Не определено	354	0,56
Maxan MX2450	TDP-40		480	0,42
Benefon Delta	TDP-51SN2	1,418	501	0,4
Benefon Sigma	TDP-52SN3	Не определено	600	0,33
Benefon Sigma Gold		1,23		

Таблица 6

Результаты исследований электромагнитного излучения радиотелефонов сотовой связи стандарта GSM

Торговая марка	Обозначение	Мощность на входе антенны, Вт	Максимальный уровень излучения на расстоянии 5 см от антенны радиотелефона, мкВт/см^2	Допустимое время работы при нагрузке 200, мкВт*ч/см^2
1	2	3	4	5
Nokia 1610	NHE-5NX	0,32	125	1,6
Nokia 1611	NHE-5SX	0,32	125	1,6
Nokia 2110i	NHE-4NX	0,331	125	1,6
Nokia 8110	NHE-8	0,324	100	2
Nokia 3110	NHE-6BX	0,331	125	1,6
Motorola	6200	0,372	126	1,59
Flare	MGl-4E12	не определено	63	3,17
Motorola Starac 70			125	1,6
	MGl-4A11	не определено	63	3,17
Motorola	8700		40	5
Startac 85		0,331	63	3,17

Продолжение табл. 6

1	2	3	4	5
Motorola d460	1050701-BVCAA	0,363 не определено	159 44	1,26 4,55
Motorola 8700	1050602-BVEAA	не определено	79 80	2,53 2,Ээ5
Moxon 3000	CV-DX 1000 CMD-Zl	не определено	50 100	4 2
Ericsson GH/GF388	ICD828/GP	не определено	125 63	1,6 3,17
Ericsson GH528	TCD308/GP	не определено	50	4
Ericsson GH688		не определено		
Ericsson GF788		не определено		
Sony CM-DX 1000		не определено		
Sony CMD-Zl		не определено		
Philips Spark Philips		не определено		
Genie Philips Doqa		не определено		

Появление электромагнитного фона техногенного происхождения не могло не сказаться на состоянии здоровья населения и жизнедеятельности других биообъектов. Ещё в далёкие 70-е годы американские онкологи установили взаимосвязь между уровнем электромагнитного фона и распространённостью злокачественных опухолей. Существует также взаимосвязь и между уровнем излучения и сердечно-сосудистыми заболеваниями, а также нервно-психическими расстройствами. Из научной литературы известно, что в зависимости от частоты и мощности радиоизлучения происходит нарушение работы головного мозга и центральной нервной системы. Облучение в радиодиапазоне вызывает у человека ощущение шумов и свиста. Свыше 30-ти лет тому назад за рубежом сообщалось даже об открытии эффекта радиослышимости, суть которого состоит в том, что люди, находившиеся в поле мощной радиовещательной станции, слышали «внутренние голоса», речь, музыку и т.д. Такая реакция организма на электромагнитное «загрязнение» основана на возможности детектирования несущих колебаний во внутренних нелинейных средах человека (и возможно животных) с последую-

щим преобразованием сигналов для их дальнейшего восприятия слуховым нервом.

Характер распределения электромагнитного фона внутри городской черты зависит от большого количества факторов: диаграммы направленности излучателя, рельефа местности, этажности застройки и равномерности её распределения в пределах города, времени года, метеоусловий и пр. Результаты измерений могут сильно отличаться друг от друга, поэтому необходимо какое-то их усреднение. В качестве примера на рис. 10 приведён электромагнитный фон г. Томска, создаваемый на несущей частоте УКВ-ЧМ-вещания. Штриховкой отмечен городской район, в котором преобладает количество умерших от злокачественных опухолей. Из рис. 10 видно, что этот район прилегает к радиотелецентру г Томска. Однако на появление онкологических заболеваний влияют многие факторы. И полной уверенности, что они обусловлены только действием электромагнитного фона, здесь быть не может. Необходимо проведение в этом направлении дополнительных исследований. На рис. 11 представлена полная картина количества умерших от онкологических заболеваний в г. Томске, из которой видно, что существуют ещё два района с большим уровнем заболеваемости. Один из них прилегает к золоотвалу.

2.4. ПОМЕЩЕНИЕ, КАК ОБЪЁМНЫЙ РЕЗОНАТОР, РЕАГИРУЮЩИЙ НА ВНЕШНИЕ И ВНУТРЕННИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Расположение жилых и служебных помещений «в прямой видимости» радио- и телевизионных передатчиков может привести к усилению электромагнитных полей внутри этих помещений, которые условно можно представить в виде объёмных резонаторов.

Резонатором называется полость, окружённая со всех сторон проводящей оболочкой. В таких полостях можно возбуждать электромагнитные колебания подобно тому, как в полостях, ограниченных твёрдыми стенками, можно возбуждать звуковые колебания. Для того чтобы понять принцип работы резонатора, необходимо вспомнить один интересный результат: две волны, распространяющиеся навстречу друг другу, при сложении образуют картину стоячих волн, и наоборот – любую стоячую волну (которая представляет собой определённое пространственное распределение электрических и магнитных полей) можно представить в виде двух распространяющихся навстречу волн. (В обоих случаях частоты этих волн должны быть одинаковыми). Точки, где амплитуда электрического поля максимальна, принято называть пучно-

стями, а точки, в которых амплитуда поля равна нулю, – узлами колебаний. Для того чтобы пучность и узлы колебаний были более чётко выражены, необходимо чтобы амплитуды колебаний обеих волн были одинаковыми. Условное изображение стоячей волны показано на рис. 12.

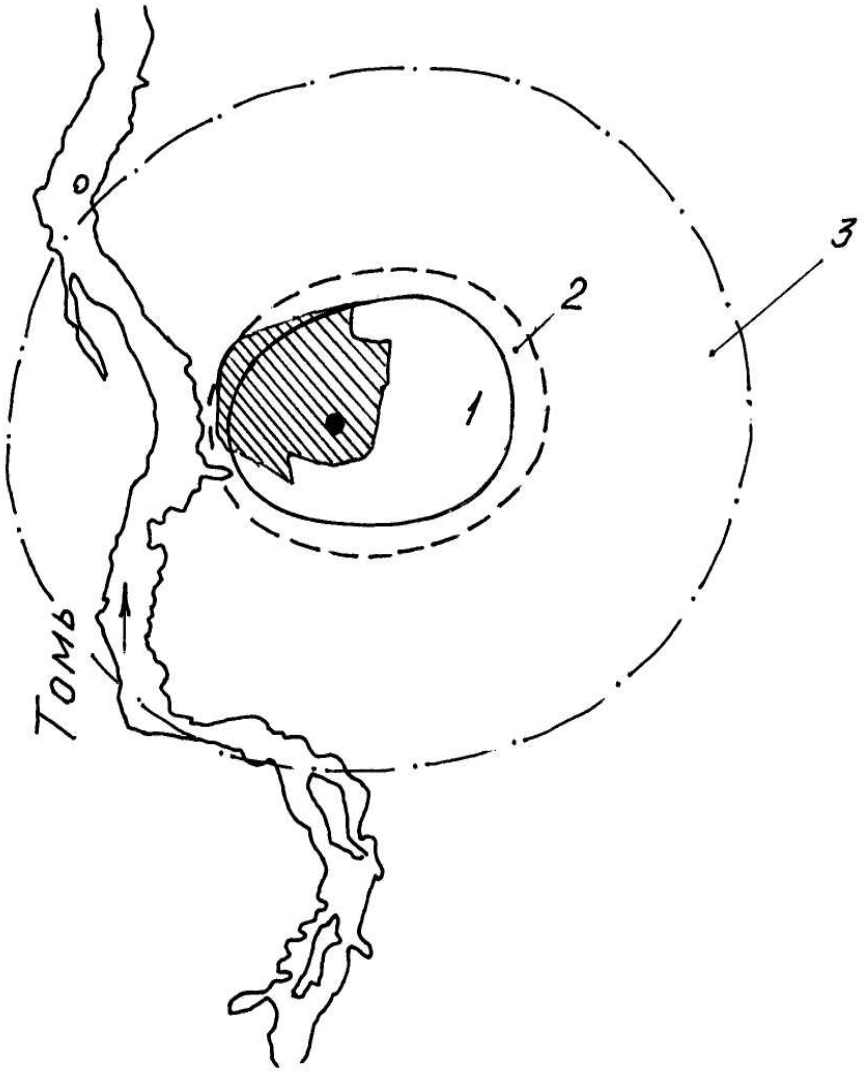


Рис. 10. Электромагнитный фон г. Томска на частоте 67,22 МГц, создаваемый УКВ-ЧМ-вещанием (мощность передатчика 1 кВт; место его размещения отмечено; штриховкой выделен район г. Томска, в котором количество умерших от онкологических заболеваний является максимальным)

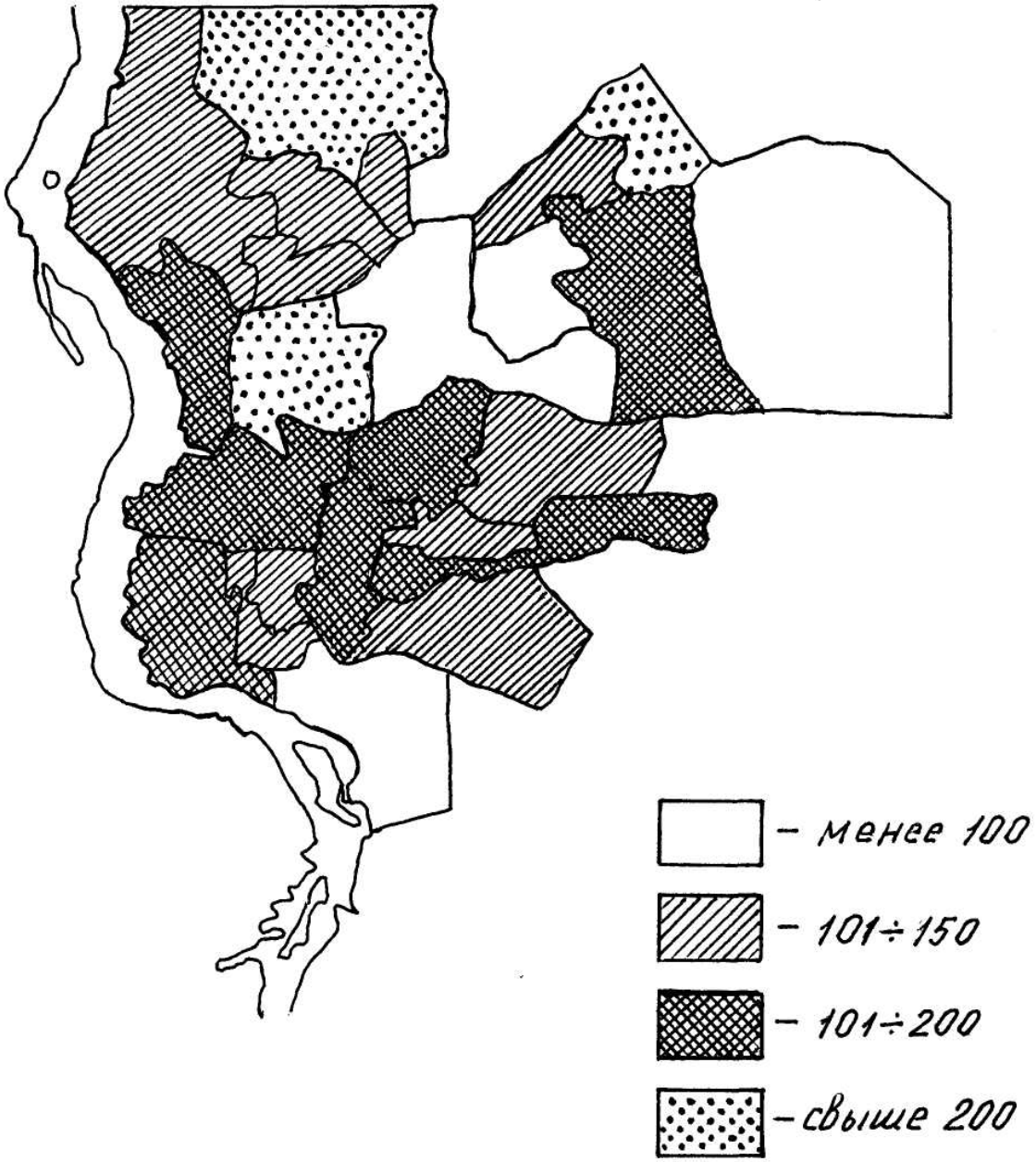


Рис. 11. Количество умерших от онкологических заболеваний в г. Томске в пересчёте на 100 тысяч населения (данные СФ РАМН)

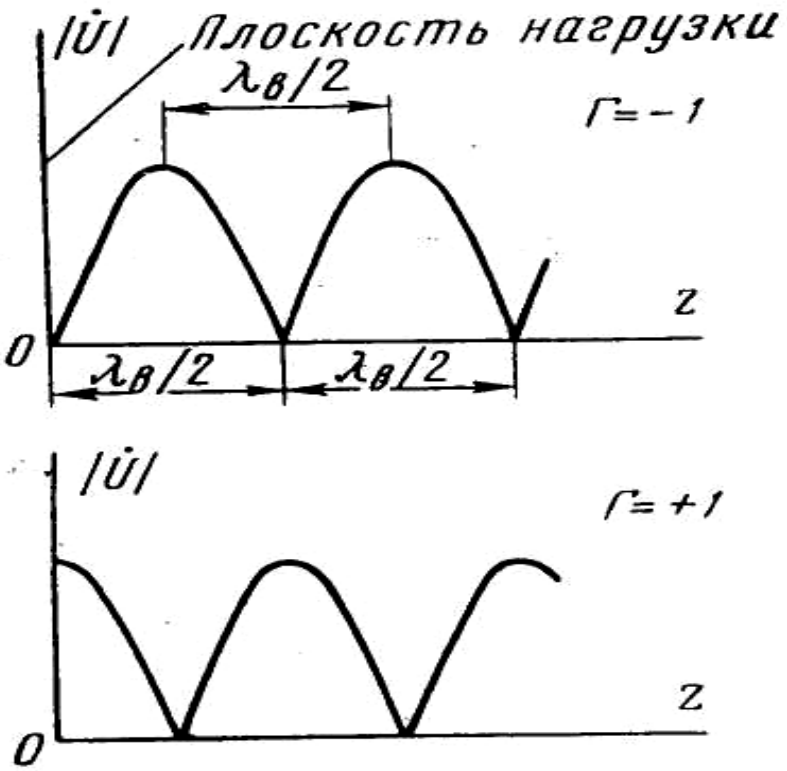


Рис. 12. Различные режимы распределения напряжения в передающей линии без потерь, отличающиеся величиной коэффициента отражения

Отсюда нетрудно понять, почему резонаторы откликаются не на все колебания, а только на те, которые содержат любое целое число полуволн по всем геометрическим размерам резонатора. При этом очевидно, что колебания в резонаторе будут более устойчивыми, если проводящие стенки (поверхности) резонатора приходятся на узлы колебаний, когда напряжённость электрического поля оказывается наименьшей. Из курса радиофизики известно, что такие резонаторы могут накапливать энергию. При этом условия возникновения колебаний, их амплитуда и длительность существования определяются как размерами и характером строения (кирпичное, деревянное, крупнопанельное), так и степенью их экранирования от радиоволн.

Способность такого резонатора накапливать электромагнитную энергию определяется его добротностью. Чем больше величина добротности Q, тем больше оказывается и величина напряжённости электрического поля. Добротность резонатора удобно выражать через реактивную энергию, накопленную в системе в режиме установившихся колебаний $W_{нак.}$, и энергию, рассеянную в резонаторе за один период колебаний $(W_{рас.})_T$, то есть

$$Q = W_{нак} / (W_{рас})_T = \omega_o \frac{W_{нак}}{P_{рас\,рез}} \ , \qquad (6)$$

где ω_o – резонансная частота резонатора, равная 2π/Т, а $P_{рас\ рез}$ – мощность, рассеиваемая в объёмном резонаторе.

Отсюда становится понятным, почему действие электромагнитных полей оказывается избирательным для различных помещений. Самой высокой добротностью обладают кабины радиолокационных станций, выполненные из металла, затем следуют крупнопанельные дома с металлической арматурой, а самыми безопасными являются обычные палатки.

Справедливости ради необходимо признать, что помещение может усиливать электромагнитный фон не только техногенного, но и природного происхождения. Отсюда следуют многочисленные рассказы о «домовых», «полтергейстах» и прочих суевериях, о которых столь часто стали сообщать различные средства массовой информации. Однако, рассмотрение этой экзотики выходит за рамки данного учебного пособия.

Для того чтобы лучше понять возможности защиты от электромагнитного излучения, остановимся на особенностях распространения радиоволн.

3. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН

Энергия, переносимая электромагнитной волной, сосредоточена в электрическом и магнитном полях. Её объёмные плотности могут быть представлены соответственно в виде следующих соотношений:

$$W_E = \frac{\varepsilon E^2}{2} \left[\text{Дж/м}^3\right] \ W_н = \frac{\mu H^2}{2} \left[\text{Дж/м}^3\right], \qquad (7)$$

где ε и μ – диэлектрическая и магнитная проницаемость среды.

Для свободного пространства (вакуума) эти значения составляют:

$$\varepsilon_o = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} \left[\text{Ф/м}\right], \qquad (8)$$
$$\mu_o = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\text{Гн/м}\right],$$

а скорость распространения волны ($V = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$) равна скорости света c.

Интенсивность переноса энергии характеризуется плотностью потока мощности (ППМ), то есть потоком энергии, которая проходит че-

рез единицу поверхности в секунду. Направление переноса энергии определяется вектором Пойтинга (или, как отмечается в отдельных источниках информации, Умова-Пойтинга):

$$\boldsymbol{\Pi} = [\boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{H}]. \tag{9}$$

Для изотропного излучателя плотность потока, мощность поля которого во всех направлениях одинакова, величина потока мощности, усреднённая за период колебаний, равна

$$\Pi_{cp} = \frac{P_{\Sigma}}{4\pi R^2}, \tag{10}$$

где P_{Σ} – мощность источника радиоизлучения, R – расстояние от излучателя до точки приёма волны.

Волновым фронтом называется поверхность, все точки которой имеют одинаковую фазу. Другими словами, волновой фронт – это условная поверхность, характеризующаяся тем, что радиоволны, излучаемые антенной в разных направлениях, достигают её в одно и то же время. У точечного источника излучения волновой фронт сферический, а у линейного – цилиндрический. На больших расстояниях от источника излучения небольшой участок волнового фронта является плоскостью, которая перпендикулярна направлению переноса энергии электромагнитного поля. Волна в этом случае называется плоской.

В сферической волне амплитуда поля уменьшается пропорционально I/R, а в цилиндрической – $I/\sqrt{R}$. В отсутствие затухания амплитуда плоской волны с расстоянием не изменяется.

Уровень электромагнитного фона в любой точке пространства сложным образом зависит от рельефа местности, метеоусловий, времени года, растительности и этажности застройки.

В пределах прямой видимости связь между напряжённостью электромагнитного поля и мощностью источника излучения выражается формулой Б.А. Введенского, полученной для «плоской земли»

$$P = \frac{E \cdot \lambda \cdot R^2}{1200\pi\sqrt{D} \cdot h_1 \cdot h_2}, \tag{11}$$

где P – мощность излучателя, кВт;

E – напряжённость поля, мкВ/м;

λ – длина волны, м;

R – расстояние, км;

D – коэффициент направленности передающей антенны по мощности в вертикальной плоскости;

h_1 – высота передающей антенны, м;

h_2 – высота точки приёма радиоволны, м.

Диаграмма направленности показывает зависимость плотности потока мощности (ППМ), или амплитуды напряжённости, поля антенны от направления в пространстве при постоянном расстоянии до точек наблюдения.

Большинство излучателей техногенного происхождения является неизотропными. Не представляют исключение в этом отношении и радио- и телепередатчики Томского телецентра (см рис.10) и других излучателей. Существует явная ассиметрия в распределении напряжённости электрического поля относительно источника излучения. Распределение электрических полей слабо зависит от передающей частоты (49,75; 56,25 и 215,25 МГц). Отличия состоят лишь в уровнях полей, что обусловлено различной мощностью передатчиков. Ассиметрия в распределениях электрических полей может оказать определённое влияние на характер и распространение заболеваемости среди населения, и это обстоятельство необходимо учитывать при выявлении дискомфортных зон для проживания человека.

Средняя мощность электромагнитного поля может быть рассчитана с помощью известного соотношения:

$$P_{ср} = \frac{1}{2}|E||H| = \frac{|E|^2}{2\rho_o} = \frac{|E|^2}{2 \cdot 377}, \qquad (12)$$

где ρ_o=377 Ом – волновое сопротивление свободного пространства. Эта величина имеет постоянное значение во всём диапазоне длин волн.

4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Биологические объекты, подобно другим физическим телам, при температуре выше нуля градусов по шкале Кельвина излучают электромагнитные волны, которые можно зарегистрировать с помощью чувствительной аппаратуры на частотах от 10 кГц до 100 ГГц.

Субстанции, содержащиеся в теле человека, излучают энергию вследствие хаотического движения зарядов (ионов).

Интенсивность теплового излучения J биологического объекта описывается формулой Рэлея-Джинса:

$$J(f,T) = \frac{2kT_я}{\lambda^2} = \frac{\chi 2kTf^2}{c^2}, \qquad (13)$$

где χ – коэффициент излучения тела; k – постоянная Больцмана; c – скорость распространения света в среде, м/с; $T_я$ и T – яркостная и термодинамическая температуры тела, К; f – частота излучения, Гц; λ – длина волны, м.

Напомним, что яркостная температура $T_я$ – физический параметр, применяемый для количественной характеристики спектральной плотности любого тела нагретого до температуры T, имеющего сплошной спектр. Другими словами, яркостная температура равна такой температуре T абсолютно чёрного тела, при которой спектральная плотность исследуемого тела в том же интервале длин волн.

Для тела биообъекта с температурой около 300 К такое тепловое излучение наиболее интенсивно происходит в инфракрасном диапазоне длин волн. В этом диапазоне человек излучает мощность, примерно равную 10 мВт с одного квадратного сантиметра поверхности своего тела, что в целом с поверхности тела взрослого человека составляет около 100 Вт. Это излучение затем далеко уходит от человека, поскольку оно «попадает» в окно прозрачности атмосферы (λ=8÷10 мкм). Тепловое излучение инфракрасного диапазона длин волн не является чисто гармоническим и, как правило, промоделировано различными биологическими процессами. Последнее обстоятельство с успехом может быть использовано для диагностики заболеваний различных органов человека (или животных).

Радиотепловое излучение характеризует температуру и временные ритмы внутренних органов человека. В настоящее время существует целое направление в биофизике, которое изучает возможность восстановления пространственного распределения температуры в глубине биологического объекта по его радиотепловому излучению.

Низкочастотные электрические поля (f=0÷1 кГц) связаны, преимущественно, с электрохимическими потенциалами, которые характеризуют функционирование различных органов и систем человека (сердца, желудка и пр.). Однако электрические поля, создаваемые этими колебаниями, в значительной степени экранируются высокопроводящими тканями биообъекта. Что касается магнитных полей, то отмеченная на них экранировка не распространяется.

Кроме перечисленных видов электромагнитного излучения, жизнедеятельность биологического объекта сопровождается также наличием высокочастотных акустических сигналов (в виде шума), появление которых связано с процессами на молекулярном и клеточном уровнях.

Таким образом, из проведённого рассмотрения следует, что электромагнитный фон природного или техногенного происхождения является неотъемлемой частью нашей жизни. В той или иной степени он характерен для любого живого существа, населяющего нашу планету. Научно-техническая революция лишь изменила уровень и частотный диапазон этого фона, превратив отдельные районы земного шара в зону экологического бедствия. Является совершенно очевидным, что элек-

тромагнитное загрязнение среды должно оказывать своё влияние на человека и на другие живые существа. Подвержены действию радиоволн и растения. Ещё в 1931 году немецкий учёный А. Дэнир показал, что под действием дециметровых волн ускоряется прорастание тюльпана и деление памереций.

5. БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

Механизм биологического действия электромагнитных волн отличается значительной сложностью и в настоящее время до конца ещё не изучен. Однако эти обстоятельства не мешают разработке основных принципов защиты человека от действия электромагнитных полей.

Прежде чем перейти к рассмотрению медицинских аспектов действия радиоволн приведем некоторые физические величины, характеризующие человека и среду его обитания

- *Электрическое поле у поверхности тела человека* 15 В/м
- *Электростатическое поле Земли у её поверхности* 130 В/м
- *Поле под ЛЭП 330 кВ* 3,5–5,0 кВ/м
- *Поле под ЛЭП 750 кВ* 10,0–15,0 кВ/м
- *Поле под грозовым облаком* 10 кВ/м
- *Поле в сауне* десятки кВ/м
- *Поле в мембране клетки* 107 В/м
- *Поле в атоме* 109 В/м

Биологическая активность электромагнитных волн зависит от длины волны облучения. Условно любой биологический объект (человек, мышь, кролик и другие биообъекты) можно рассматривать с двух точек зрения:

- *во-первых*, как физическое тело, обладающее определёнными электрическими и магнитными свойствами, которые отвечают за его взаимодействие с электромагнитными полями, то есть на *макроуровне*;
- *во-вторых*, на уровне элементов, входящих в состав биологического объекта, то есть на *микроуровне*, который определяется атомно-молекулярными связями и химическими превращениями, протекающими непосредственно в биообъекте под воздействием электромагнитных полей (ЭМП).

В настоящее время известны следующие виды воздействия ЭМП на человека:

1. Тепловое воздействие на все тело человека или на отдельные его части, включая термический ожог.

2. Неблагоприятное воздействие слабоинтенсивных ЭМП на центральную нервную систему. Различают три степени воздействия: лёгкую, которая характеризуется начальным проявлением астенического и нейроциркулярного синдромов; среднюю, когда симптомы указанных синдромов усилены и сочетаются с начальными проявлениями эндокринных нарушений; тяжёлую, при которой усилена симптоматика нарушений функций центральной нервной, сердечно-сосудистой и эндокринной систем человека и проявляются разнообразные психические нарушения.

3. Эффект «жемчужной цепочки» (pearl chain effect), обусловленный силами, действующими на клетки крови (эритроциты и лейкоциты), помещённые в импульсное или постоянное поле с частотой 1…100 МГц. Образование цепочек связано с притяжением между частицами, которые под действием поля приобретают дипольные моменты. Цепочки ориентируются параллельно силовым линиям электрического поля.

4. Насыщение диэлектрической проницаемости растворов белков или других биологических макромолекул, что приводит к резонансным поглощениям излучения живой клеткой.

5. Эффект «радиозвука» у людей, облучаемых радиолокационными сигналами средней мощности.

6. Влияние на сердечно-сосудистую систему, в том числе снижение артериального давления и замедление ритма сердца.

7. Демодулирующее действие. Наблюдались изменения электроэнцефалограмм и электрокардиограмм под воздействием ВЧ-излучения.

Действие мощного электромагнитного излучения на человека удобно также рассмотреть на примере микроволнового оружия нелетального воздействия (ОНЛВ).

6. МИКРОВОЛНОВОЕ ОРУЖИЕ НЕЛЕТАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Информации по этому вопросу много, и она достаточно противоречивая. Оружие нелетального воздействия разрабатывается Пентагоном. На это обстоятельство указывают отдельные доклады на конференциях, а порой и целые секции, как это было на конференции AMEREM–2002, которую проводила Военно-морская Академия США (г. Аннаполис, Maryland, США). Один из докладчиков, генерал-майор Dennis M. Scholl, даже обещал автору этих строк выслать материалы, касающиеся результатов воздействия микроволнового оружия на человека. Однако, несмотря на многочисленные напоминания об обещании,

до сих пор не сделал это. Причина такой необязательности простая: исследования окутаны завесой секретности.

6.1. Состояние исследований в области оружия нелетального воздействия радиоволн на человека

Первая информация о негативных последствиях облучения человека радиоволнами появилась ещё в 30-х годах прошлого века. В годы Второй мировой войны американцами был выполнен ряд исследований в связи с жалобами личного состава кораблей на ухудшение здоровья. Как правило, жалобы поступали от лиц, работающих с радиолокационными станциями (метровый, дециметровый и сантиметровый диапазон длин волн). Однако авторы исследований не пришли к какому-либо определённому выводу относительно клинической значимости воздействия радиоволн на человека.

Любопытно, что и в Советской Армии на эту проблему также долгое время не обращали внимание. В конце 50-х годов были нередки случаи, когда демобилизованные солдаты после трёх лет службы в армии возвращались домой облысевшими. Пострадавшие со смехом объясняли, что они часто попадали в зону облучения передающей антенны РЛС.

Однако вторая половина XX века и текущего столетия характеризуется широким использованием источников микроволнового излучения, как в различных сферах хозяйственной деятельности, так и в вооружённых силах. Большое распространение в частях противовоздушной обороны, авиации, на кораблях и в частях военно-морского флота получили СВЧ-генераторы (магнетронного или клистронного типа), которые служат для радиосвязи, радиолокации, радионавигации и других целей. Столь широкое использование микроволн привело к тому, что многочисленные контингенты военнослужащих в процессе испытания, ремонта-наладки и эксплуатации радиотехнических систем могут подвергаться воздействию радиоволн. Существует также опасность такого облучения и для личного состава соседних частей или гражданского населения. При соблюдении специалистами условий эксплуатации радиотехнической аппаратуры (а личным составом – техники безопасности) практически исключается негативное влияние СВЧ-излучений на здоровье работающих. Исключение из правил составляют лишь аварийные ситуации. Опыт, накопленный при лечении пострадавших, позволяет проанализировать характер воздействия микроволнового излучения на человека.

В табл. 7 представлен весь спектр жалоб лиц, длительное время подвергавшихся воздействию радиоволн сантиметрового и дециметрового диапазона *в пределах допустимого уровня (ПДУ)*. Статистикой было охвачено 100 мужчин в возрасте 25–40 лет с «чистыми» формами поражений (то есть без сопутствующих заболеваний) [24], для которых работа с источниками микроволнового излучения была основной. Из табл. 7 следует, что обследованные чаще всего жаловались на быструю утомляемость, головные боли, слабость, раздражительность, боли в области сердца и тревожный сон (свыше 50 % от общего числа жалоб), а также на потливость, снижение памяти, эмоциональную неустойчивость, головокружение.

Механизмы воздействия микроволнового излучения на организм человека можно условно разделить на энергетические и информационные. В настоящее время наиболее полно изучено тепловое действие мощных потоков СВЧ-излучения.

Информационное же действие электромагнитных волн человека сравнительно малых мощностей микроволнового излучения изучено слабо. С точки зрения быстрого и эффективного воздействия на живую силу противника информационное действие СВЧ-излучения, видимо, менее перспективно.

Первые сведения об оружии нелетального воздействия (как о несмертельном оружии) появились в начале 90-х годов. Необходимость его создания было своего рода реакцией американских военных на изменения в характере локальных конфликтов после распада двуполярной системы.

Понятие *оружие нелетального воздействия* появилось в августе 1990 года в докладе командования TRADOC, который был посвящён разработке новой концепции проведения воздушно-наземных операций. (TRADOC – это сокращённое название в английском языке организации, занимающейся тренировкой военных, проведением военного анализа и разработкой стратегии Вооружённых сил США).

ОНЛВ все больше превращается в инструмент ведения войны и со временем может изменить наши представления о войне, которая всё больше будет превращаться в инструмент управления живыми людьми.

Анализ открытых публикаций западных учёных, а также тематики докладов, представленных на международных конференциях, дают основания утверждать, что НИР, касающиеся оружия нелетального воздействия превратились в отдельную отрасль исследований и разработок. В США на проведение таких работ выделяется из бюджета около 16 млрд долларов. Однако по оценкам ряда зарубежных специалистов в

действительности на эти цели прямо или косвенно тратится до 40 % средств, выделяемых на все военные исследования в стране.

Таблица 7

Характер и частота жалоб у лиц, подвергающихся длительному воздействию СВЧ-излучений (на 100 обследованных)

Наименование жалоб	С жалобами	Без жалоб
1	2	3
Быстрая утомляемость	96	4
Головные боли	86	14
Слабость	72	28
Раздражительность	97	43
Боли в области сердца	54	46
Тревожный сон	52	48
Потливость	41	50
Снижение памяти	27	73
Эмоциональная неустойчивость	24	76
Боли в животе	20	80
Снижение аппетита	19	81
Сердцебиение	17	83
Импотенция	17	83
Головокружение	17	83
Сонливость	13	87
Одышка при физических напряжениях	12	88
Отрыжка и изжога	12	88
Вздутие живота	8	92
Запоры	6	94
Похудание	5	95
Снижение зрения	4	96
Шум в ушах	4	96
Тошнота	3	97
Выпадение волос	3	97
Боли в глазах	3	97
Быстрое поседение	2	98

6.2. Общие вопросы воздействия радиоволн на человека

В настоящее время не представляется возможным предварительно рассчитать количество микроволновой энергии, поглощённой телом человека или отдельным его участком и преобразованной в теплоту. Величина поглощения сильно зависит от характеристик тела и отдельных тканей человека, от положения, размеров и структуры мышечной и жировой ткани и направления падения волны. Другими словами, поглощаемая энергия зависит от входного сопротивления такой сложной структуры, которой является человек. Существенным образом на величину поглощения влияет направление поляризации падающей волны относительно вертикального положения тела человека. Кроме перечисленных факторов, действительное повышение температуры тела человека зависит ещё от таких характеристик окружающей среды, как температура и влажность, и от механизма охлаждения тела.

При частоте колебаний падающей волны, выше 300 МГц, существует энергетическая характеристика – плотность потока энергии (ППЭ), которая измеряется в Вт/м^2 и характеризует величину энергии падающей волны. Для количественной оценки поглощённой энергии введено понятие удельной поглощённой мощности – УПМ (по терминологии англоязычных авторов SAR – specific absorption rate). Под этой характеристикой понимается количество поглощаемой мощности единицей массы тела, то есть *SAR – это усреднённая величина, характеризующая скорость поступление энергии СВЧ-излучения в поглощающее тело.* Другими словами, удельную поглощаемую мощность можно представить как мощность, отнесённую к объёму или массе тела. В первом случае она измеряется в Вт/м^3, во втором – в Вт/кг.

Экспериментальным путём установлено, что предельное течение SAR для терморегуляции человека составляет 4 Вт/кг, а ПДУ для микроволнового излучения – 0,4 Вт/кг, то есть в 10 раз меньше.

На макроуровне существует ряд резонансных частот, которые характерны для мужчины, женщины и ребёнка, когда поглощение СВЧ-излучения является максимальным (рис. 13).

В некоторых работах сердце человека рассматривается как поляризационный генератор электромагнитных волн СВЧ-диапазона, а кровеносные сосуды в качестве волноводов. В этом случае человека можно рассматривать как резонансную систему, приведённую на рис. 14. При таком подходе тело человека представляется как строго индивидуальная стоячая волна. Если за начало отсчёта принять сердце, то на рост человека приходится одна длина волны λ, от сердца до пальцев – полдлины

волны $\lambda/2$ и, наконец, от сердца до макушки головы – четверть длины волны $\lambda/4$.

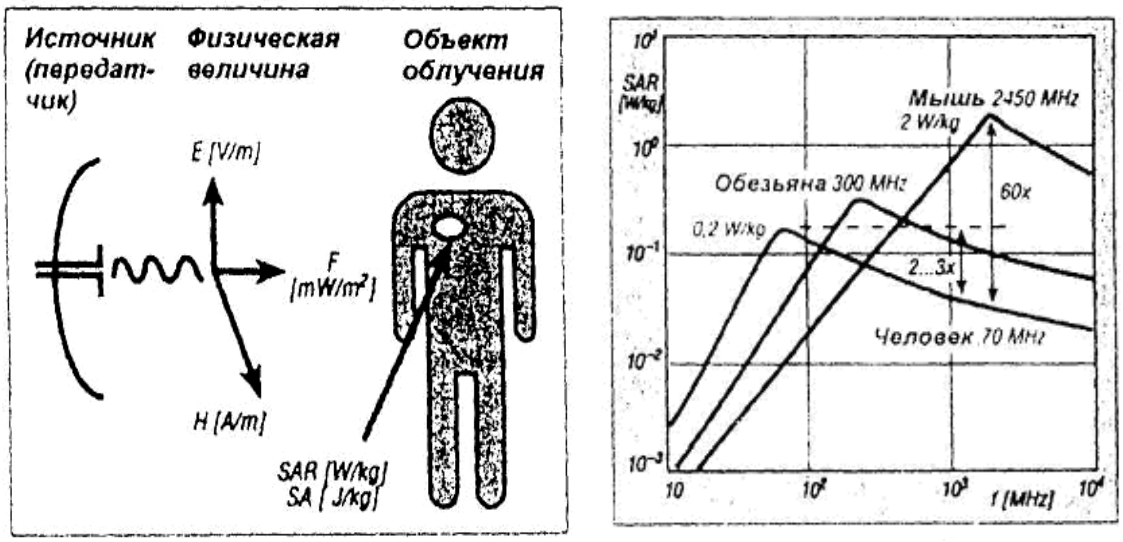


Рис. 13. Резонансные области частот для различных биологических объектов

Эффект негативного воздействия СВЧ-полей на человека определяется количеством проникающей в тело и поглощённой телом человека энергии. Энергия микроволн поглощается тканями организма и превращается в тепло, вследствие возникновения колебаний ионов и дипольных молекул, входящих в ткани человека. Наиболее эффективное поглощение СВЧ-волн наблюдается в тканях с большим содержанием воды. К ним принадлежат кровь, тканевая жидкость, слизистая желудка и кишок, хрусталик глаза и др.

Поглощение энергии приводит к нагреву тканей организма. Глубина проникновения радиоволн зависит от частоты облучения, проводимости среды и её диэлектрической проницаемости. Положение максимума температуры и его удаление от поверхности тела также зависят от приведённых выше параметров. С увеличением частоты максимум температуры приближается к поверхности тела, так как глубина проникновения поля в этом случае уменьшается.

Принято различать тепловое и нетепловое действие микроволн. Считается, что в случае теплового воздействия плотность потока энергии превышает 10 мВт/см^2, в то время как для нетеплового воздействия – ниже 10 мВт/см^2. Такое деление является в какой-то мере условным, и на практике оба механизма воздействия радиоволн на человека действуют одновременно. Кроме того, эффективность облучения зависит от

продолжительности воздействия, характера теплообмена, структуры ткани, интенсивности кровоснабжения в нагреваемой области тела и других факторов.

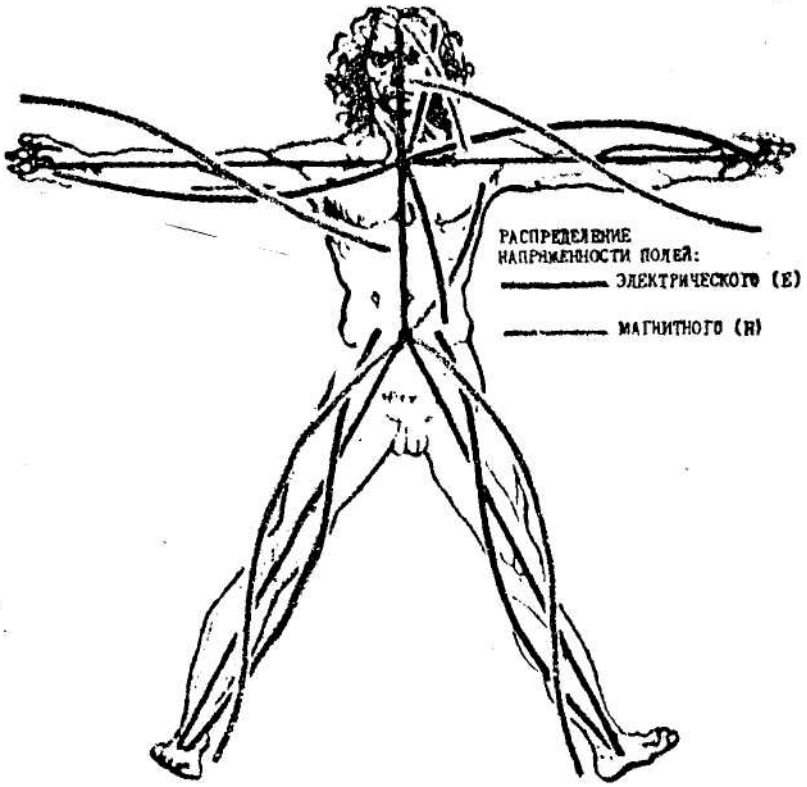


Рис. 14. Картина изменения электрической и магнитной напряжённости вдоль основных кровеносных сосудов (она получена в результате анализа модели, в которой сердце рассматривается как поляризованный генератор, а сосуды – как система диэлектрических волноводов)

Для удобства изучения изменений происходящих в живых тканях под влиянием СВЧ-излучения, ткани можно разделить на два вида:
– ткани, содержащие кровеносные сосуды;
– ткани, не содержащие кровеносных сосудов.

Микроволновый источник излучения может разогреть поверхность тела до температуры 130°С и выше. (На бытовом уровне вспомним опыт эксплуатации СВЧ-печей). Температура отдельных тканей человека или его тела начинает повышаться сразу после начала подачи СВЧ-энергии. Рост температуры продолжается в течение 15–20 минут. При этом температура облучаемой ткани может на 1–2°С превысить температуру тела. Понижение температуры в облучаемом участке тела

происходит за счёт резкого увеличения в нём потока крови, что обеспечивает отвод избыточного тепла от облучаемой ткани, то есть обеспечивается процесс саморегулирования температуры.

Отсутствие или недостаточное количество кровеносных сосудов в некоторых частях тела человека делает их особенно уязвимыми при облучении радиоволнами сверхвысоких частот. В этом случае избыток теплоты не отводится за счёт циркуляции крови, а поглощается окружающими сосудистыми тканями только за счёт теплопроводности. К тканям (органам), не содержащим кровеносных сосудов, относятся глаза и такие внутренние органы, как желчный пузырь, мочевой пузырь и желудочно-кишечный тракт.

При облучении тела человека при определённых условиях внутри организма происходит образование стоячих волн из-за отражений проникающего излучения от граничных поверхностей полостей тела и областей расположения костного мозга. В пучностях стоячих волн, то есть в местах, где величина поля максимальна, возможно также чрезмерное возрастание температуры и, следовательно, повреждение тканей. Металлические предметы, расположенные внутри или снаружи тела человека могут также привести к образованию стоячих волн.

При использовании микроволн в качестве оружия нелетального воздействия на живую силу противника «наиболее перспективными» считаются следующие виды воздействия.

Во-первых, быстрый нагрев тканей на глубине приблизительно 1/64 дюйма (около 0,4 мм) от поверхности тела человека. На этом расстоянии расположены нервные окончания, которые вызывают сильные болевые ощущения. Быстрый нагрев кожного покрова микроволнами до температуры свыше 50°С причиняет человеку острую боль, ввергая его в панику. Обеспечить проникновение поля на глубину 0,4 мм можно на частоте $f \approx 46$ ГГц.

Подобные устройства были созданы и использованы при решении полицейских задач для борьбы с уличными беспорядками. Несмотря на малые габариты и высокую эффективность воздействия, такие устройства не действуют избирательно только на демонстрантов, а поражают и полицейских, что, по мнению зарубежных специалистов, затрудняет их широкое практическое использование при разгоне демонстраций. Однако в случае боевых операций применение микроволновых генераторов, вызывающих болевые ощущения, может оказаться эффективным.

Во-вторых, быстрое изменение давления в кровеносных сосудах за счёт повышения температуры тела. Головной и спиной мозг очень чувствительны к изменениям давления. Результат облучения головы может иметь очень серьёзные последствия. Повышение температуры

мозга происходит наиболее быстро, когда голова облучается сверху или когда облучается грудная клетка, так как нагретая кровь из грудной клетки непосредственно поступает в мозг. Отсюда становятся понятными направления американских исследований, обсуждаемые на конференции AMEREM-2002. Генерал-майор ВВС США Dennis M. Scholl уделил большое внимание вопросу поглощения грудной клеткой излучения в диапазоне частот 200–1800 МГц. Согласно его исследованиям, на частоте 200 МГц поглощение практически не наблюдается, затем по мере увеличения частоты адсорбция микроволн возрастает, достигая максимального значения или частоты, равной приблизительно 800 МГц. По утверждению Шолля, это самая опасная частота воздействия на человека. О серьёзности исследований, проводимых в США, говорит тот факт, что генерал даже сам облучался, чтобы лучше понять последствия облучения человека радиоволнами и выбрать наиболее эффективную частоту воздействия. Что касается облучения непосредственно головы, то Шолль утверждает, что эффективность воздействия сильно зависит от формы головы (то есть расовой принадлежности) и пола человека. (У мужчины кости более толстые, и, как следствие этого, он менее чувствителен к облучению).

При длительном облучении у испытуемого появляются судороги, переходящие затем в паралич! Если температура головного мозга повышается на 6°С, то при облучении головы наступает смерть. Кроме того, в результате сильного облучения микроволнами у человека может произойти удушье. Пострадавшим необходимо сделать искусственное дыхание, обеспечить быстрое охлаждение тела и кислородное питание.

Рассмотрим действие электромагнитных волн на микроуровне, которое отличается от действия радиоволн на макроуровне.

6.3. Нетепловое действие электромагнитных волн. Предварительная оценка состояния работ в области разработки оружия нелетального воздействия

Нетепловое действие электромагнитных полей изучено менее полно, чем тепловое. Обусловлено это менее очевидными последствиями облучения человека и более специфическими видами воздействия микроволн на организм. Определённую роль в доступности имеющихся материалов играет и «закрытость» их тематики. В настоящее время известны три теории нетермического действия СВЧ-излучения на организм.

1) Считается, что эффекты действия слабых полей определяются кооперативными процессами, в основе которых лежат *резонансные*

взаимодействия биологических макромолекул. В качестве последних служат молекулы белка, входящие в состав мембран (напомним, что согласно теории Дебая, оптимальная частота, на которой происходит максимальное поглощение энергии электромагнитных полей, для молекул белка составляет приблизительно 10^7 Гц, то есть $\lambda \approx 0{,}8\text{-}8{,}0$ м, о чём говорилось ранее).

2) Нетепловые резонансные эффекты, протекающие под действием миллиметровых волн, связывают *с синхронизацией существующих в необлучаемой ткани несфазированных колебаний* большого числа осцилляторов, в роли которых выступают живые клетки (в частности, колебания молекул белка в мембране, колебания отдельных компонентов в молекуле гемоглобина эритроцита).

3) Для объяснения нетермических эффектов воздействие СВЧ-излучения на живую ткань привлекается теория Фрелиха, согласно которой под влиянием непоглощаемой электромагнитной энергии *происходит полярная перестройка биомолекул*, в результате чего на резонансной частоте возникают колебания большой амплитуды молекул за счёт перекачки энергии от СВЧ-поля. В живой структуре рассмотренный процесс является аналогом химического лазера.

Большинство специалистов, изучающих последствия негативного влияния электромагнитных полей на состояние здоровья и психику человека, отмечают появление следующих симптомов у облучённых:

- угнетение и истощение процессов нервной и эндокринной регуляции;
- сдвиги в обмене веществ, угнетение процесса синтеза в организме;
- снижение неспецифической резистентности и ослабление иммунитета организма;
- снижение адаптации к факторам окружающей среды.

Перечисленные последствия проявляются чаще всего у профессионалов, работающих с источниками мощного СВЧ-излучения, и проявляются они не сразу в момент облучения, а по истечении некоторого времени. Подробное описание механизмов нетермического действия СВЧ-излучения выходит за рамки данной публикации. Их рассмотрение можно найти в специальной литературе.

Из проведённого рассмотрения следует, что оружие нелетального воздействия влияет как на состояние организма, так и на психику испытуемого. Порог эффективного воздействия СВЧ-излучения (другими словами, ПДУ) в различных странах отличается на несколько порядков (до тысячи раз, как в России и США; у американцев он выше, поскольку основан на рассмотрении, преимущественно, термического действия

радиоволн на организм). В то же время существует набор частот, особо опасных для здоровья человека: 930 МГц, 1,6 и 7,0 ГГц. Первая из указанных частот является резонансной частотой головного мозга. По иронии судьбы она выбрана в качестве основной при функционировании сотовой связи.

Необходимо также отметить, что под действием мощного СВЧ-излучения в организме человека наблюдается денатурация белка, подобно тому, как это происходит в микроволновых печах при приготовлении пищи, а в случае слабых полей – нарушаются водородные связи, что может также вызвать нежелательные процессы в организме.

В связи с изложенным можно совершенно по-другому посмотреть на ряд докладов, представленных на AMEREM-2002. Фотографии грузовых машин с антенными системами говорят о серьёзных намерениях Пентагона использовать оружие нелетального воздействия в случае проведения боевых операций. Мобильность источников СВЧ-облучения достигается их размещением на автотранспорте, хотя допускает морское или воздушное базирование. Дальность действия таких систем составляет пока около 400 м.

Заметный рост температуры тела на 4–5°С достигается при ППЭ равном 300 мВт/см^2, и времени облучения – 30 минут (из доклада Шолля).

Что касается времени разогрева кожи, то необходимо приблизительно всего 10 с, чтобы зарегистрировать появление чувства боли. Эксперименты проводились с 7 мая по 28 сентября 2001 г. Из них принимало участие около 80-ти военнослужащих армии США, в том числе 15 офицеров. Исследования проводились в Air Force Research Laboratory.

Кроме США, исследования по оружию нелетального воздействия проводятся в ФРГ, Израиле, Австралии, Великобритании и ряде других стран.

7. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ВЧ- И СВЧ-ДИАПАЗОНОВ ВНУТРИ ЗДАНИЙ

В последние годы в ряде стран стали изучать распространение радиоволн на небольшие расстояния внутри помещений. Необходимость в таких исследованиях возникла, в частности, при разработке микросотовых систем персональной связи с подвижными объектами. Для микросотовых систем связи обычно используется диапазон частот 900 … 2000 МГц. При излучаемой мощности базовой станции порядка 10 мВт радиус соты составляет примерно 50 м. Системы такого рода применя-

ются преимущественно внутри крупных зданий площадью 10–15 тыс. м^2.

Возникающие при проектировании таких систем связи проблемы связаны с изменением уровня сигнала и искажений в тракте распространения радиоволн, с влиянием антенных устройств на характеристики сигнала, с обеспечением электромагнитной совместимости различных частей системы и между собой, а также со многими другими явлениями, обусловленными распространением радиоволн в промышленных, жилых, спортивных и административных зданиях.

В настоящем разделе представлены результаты исследований распространения радиоволн внутри зданий, которые получены с использованием документов ITU-R и экспериментов, проведённых в НИИ Радио и за рубежом.

Расчёт потерь мощности сигнала. Для проектирования систем связи внутри зданий удобно воспользоваться понятием потерь при распространении радиоволн. Под потерями здесь понимают отношение мощности передатчика P_1 к мощности сигнала P_2 на нагрузке приёмной антенны. Если длина волны, распространяющейся в свободном пространстве, λ, коэффициенты усиления передающей антенны G_1, приёмной антенны G_2, расстояние между антеннами r, то численное значение вектора Пойтинга (поток энергии, Вт, проходящей за 1 с через площадку в 1 м^2, перпендикулярную направлению распространения волны) в месте расположения приёмной антенны

$$\Pi = P_1 G_1 / 4\pi r^2.$$

Предполагается, что максимум диаграммы направленности (ДН) приёмной антенны направлен в сторону приходящей волны. Действующая площадь приёмной антенны, м^2,

$$A = G_2 \lambda^2 / 4\pi.$$

Выделяемая в нагрузке приёмной антенны мощность, Вт,

$$P_2 = \Pi A = (P_1 G_1 G_2 \lambda^2)/(4\pi r)^2.$$

Поскольку длина волны (м) связана с частотой (МГц) соотношением $\lambda=300f$, потери передачи в свободном пространстве

$$L_o = P_1 / P_2 = f^2 r^2 / 570{,}55 G_1 G_2, \qquad (14)$$

или в децибелах

$$L_o \approx 20\lg f + 20\lg r - 10\lg G_1 - 10\lg G_2 - 28.$$

В реальных условиях (внутри помещений) мощность сигнала отличается от мощности сигнала в свободном пространстве, где, как видно из (14), потери растут в соответствии с законом $L \sim r^n$, $n=2$.

Внутри зданий показатель степени n может быть больше, а иногда меньше 2. Из-за многолучевого действия сигнала в месте приёма уро-

вень сигнала от точки к точке изменяется случайным образом. Построив статистическое распределение уровней в различных точках поперёк трассы, можно определить медианное значение потерь на заданном расстоянии:

$$L(50) = 20\lg f + 10\tilde{n}\lg r + L_q(m) - 10\lg G_1 - 10\lg G_2 - 28,$$

где $\tilde{n}$ – реальная степень возрастания потерь; $L_q(m)$ – потери сигнала в стенах и перекрытиях зданий, дБ; m – число препятствий; f – частота сигнала, МГц; r – расстояние от точки передачи до точки приёма, м.

Параметры $\tilde{n}$ и $L_q(m)$ определяются по результатам многочисленных экспериментов.

Распределение уровней сигнала по местоположению в помещении, как будет отмечено далее, близко к логарифмически нормальному закону со стандартным отклонением σ, дБ. Поэтому потери сигнала, превышаемые в M % мест площади помещения,

$$L(M\%) = L(50) + K\sigma,$$

где K – коэффициент, определяемый из статистического распределения уровней, нормированного к стандартному отклонению. В частности, при $M=50$ %, $K=0$; при $M=90$ %, $K=1,3$; при $M=99$ %, $K=2,35$.

Уровень сигнала, естественно, следует уменьшить на величину потерь в фидере. Кроме того, необходимо учесть ослабление из-за поглощения излучаемой мощности и экранирования антенны телом оператора (абонента). Это ослабление на частоте 460 МГц составляет 22 дБ, а на частоте 930 МГц – 19 дБ при расположении антенны в непосредственной близости к абоненту.

Зависимость степени возрастания потерь от расстояния. Величина $\tilde{n}$ различна для разных помещений и изменяется от частоты. Это положение подтверждают данные табл. 8, заимствованной из документа ITU-R. Однако эксперименты, проведённые различными авторами, показали, что значение показателя степени определяется прежде всего видом трассы внутри помещения. Условно их целесообразно подразделять следующим образом:

● трассы с прямой оптической видимостью:

а) в пустом помещении; б) при наличии в помещении большого числа мешающих металлических предметов (шкафы, станки и т.п.);

● трассы с прямой радиовидимостью;

● закрытые трассы.

На трассах с прямой оптической видимостью линия визирования (соединяющая центры передающей и приёмной антенн) не перекрывается никакими препятствиями и не касается их. На трассах с прямой радиовидимостью сигнал принимается в главном направлении излучения передающей антенны, но за «радиопрозрачной» (деревянной, каменной,

железобетонной) стеной. На закрытых трассах сигнал принимается в стороне от главного направления излучения передающей антенны вследствие переизлучения (дифракции, отражения, рассеяния) радиоволн от стен, потолка и пола.

Значения $\tilde{n}$, полученные экспериментально, представлены в табл. 9, где m – число стен, через которые проходит сигнал. Данные для частоты сигнала 5 ГГц взяты из вклада. Эксперимент в этой работе проводился с рупорными антеннами, имеющими коэффициент усиления 15 дБ. Высота антенн над полом составляла 2,5 и 1,5 м. Оказалось, что как на данном этаже, так и под этажом ниже $\tilde{n} = 3{,}1$, хотя ослабление сигнала, вносимое полом, было $L_q(1) = 16$ *дБ.*

В отличие от этих результатов эксперименты показали, что после прохождения сигнала через стену, стоящую на пути распространения радиоволны, значение $\tilde{n}$ возрастает. Иначе говоря, уровень сигнала за препятствием начинает спадать быстрее. Установлено, что поляризация волны и коэффициент усиления приёмной антенны не оказывают заметного влияния на скорость спадания. На трассах с прямой оптической видимостью, например в пустом коридоре, потери с расстоянием убывают медленнее, чем в свободном пространстве $(\tilde{n} < 2)$.

В общем случае значение $\tilde{n}$ меняется в широких пределах. Так, по данным внутри здания, в диапазоне частот 1000 … 2000 МГц $\tilde{n}$ меняется от 3,8 до 6,5; по данным на частоте около 1300 МГц – от 1,8 до 2,81. В случае прямой видимости $\tilde{n} = 1{,}49$. Эти данные не противоречат приведённым в табл. 9.

Потери в стенах и перекрытиях зданий. В документе ITU-R приводится таблица (см. табл. 10) для определения потерь сигнала $L_q(m)$, проникающего через m перекрытий (этажей) здания, в зависимости от его частоты.

Точное определение потерь сигнала, проходящего через стены или перекрытия, осуществляется не так просто, как может показаться на первый взгляд. Это связано с тем, что в месте приёма наблюдаются значительные пространственные флуктуации (максимумы и минимумы) сигнала, а также тем, что сигнал частично проходит окольными путями вокруг препятствия.

Эксперименты показывают, что наименьшие потери сигнала наблюдаются в сухих стенах и перекрытиях. Однако при увлажнении таких препятствий потери резко возрастают. Кроме того, потери зависят от материала, из которого сделано препятствие (дерево, кирпич, железобетон), и в некоторых случаях от типа поляризации радиоволн. Частота сигнала и толщина препятствия незначительно влияют на величину потерь. Проведённые авторами измерения в сухой стене, сделанной из

горизонтально положенных брёвен, показали, что потери при вертикальной поляризации (ВП) меньше, чем при горизонтальной (ГП) (см. табл. 11).

Таблица 8

Частота, ГГц	Значение показателя степени возрастания потерь		
	Жилое помещение	Офис	Помещение для торговли
0,9	–	3,3	2
1,2 … 1,3	–	3,2	2,2
1,8 … 2	2,8	3	2,2
4	–	2,8	2,2
60	–	2,2	1,7

Примечание**:** 1) На частоте 60 ГГц имеется в виду распространение сигнала в одном помещении.

2) На расстояниях свыше 100 м сказывается поглощение волн в газах, которое можно учесть в соответствии с Rec. ITU-R P. 676.

3) В тех случаях, когда значение $\tilde{n}$ не дано, оно может быть взято таким же, как для офиса.

Таблица 9

Частота, ГГц	Значение $\tilde{n}$ для трассы				
	с прямой оптической видимостью		с прямой радиовидимостью		закрытой
	а)	б)	m = 1	m = 2	
0,05	3	–	3	–	–
0,7	≤ 1,5	2	2,3	3,	–
2,7	1,5	1,7 – 2	4	5	10–13

Таблица 10

Частота, ГГц	Потери сигнала при прохождении через *m* перекрытий, дБ		
	Жилое помещение	Офис (контора, ведомство)	Помещение для торговли
0,9		9 *(m = 1)* 19 *(m = 2)* 24 *(m = 3)*	
1,8 … 2	4 *m*	15 + 4 *(m –- 1)*	6 + 3 *(m –- 1)*

Таблица 11

Частота, ГГц	Потери в сухой стене, дБ		
	деревянной (брёвна) ВП/ГП	кирпичной ВП и ГП	железобетонной ВП и ГП
0,06	–	–	8,5 – 10
0,7	2/4	–	6 – 12
1,0	–	4,5 – 6	–
2,7	3,5/8	5 – 8	6 – 12

Таблица 12

Частота, ГГц	Потери в межэтажном перекрытии, дБ	Примечание
0,05 … 0,1 0,3 2,7	10 – 15 8 12	Многоэтажное железобетонное здание (офис)
5	16	По данным
2,7	7,5	Кирпичное 3-этажное здание (офис)

В мокрой деревянной стене потери возрастали, как минимум, на 5 дБ, в сильно увлажнённой стене на частоте 2,7 ГГц достигали примерно 13 дБ при обеих видах поляризации.

Результаты измерения потерь сигнала в сухих кирпичных (толщина 17–40 см) и железобетонных (толщина 15–40 см) стенах при ВП и ГП показаны в табл. 11. После полива кирпичной стены потери возрастают примерно в 3–4 раза.

Результаты измерения потерь в межэтажном перекрытии приведены в табл. 12. Установлено, что поляризация радиоволн практически не влияет на величину потерь.

Замирание и деполяризация сигнала. Внутри помещений уровень сигнала изменяется случайным образом от точки к точке пространства. В документе ITU-R указывается, что вид статистического распределения уровней сигнала близок к логарифмически нормальному закону со стандартным отклонением σ для частот сигнала 1,8 … 2 ГГц, равным 5,2. Значения σ из указанного документа приводятся в табл. 13.

Эксперименты в 18-этажном современном здании института (офиса) на частотах 0,7 и 2,7 ГГц показали примерно такое же значение стандартного отклонения.

Кроме пространственных флуктуаций уровня наблюдаются изменения уровня сигнала во времени из-за отражения, рассеяния и поглощения волн движущимися объектами (люди, двери, лифт и т. п.).

При распространении радиоволн внутри помещения происходит деполяризация излучаемой радиоволны. Например, при излучении горизонтально поляризованной волны в месте приёма появляется «паразитная» вертикально поляризованная волна, и наоборот. Под деполяризацией обычно понимается разность в дБ:

$$Д = E - E_{из},$$

где $E_{из}$ – напряжённость поля составляющей сигнала, имеющей поляризацию излучаемого сигнала; E – напряжённость поля составляющей сигнала, имеющей другую («паразитную») поляризацию.

Эксперименты, связанные с изучением деполяризации сигнала, проводились при ГП излучаемой волны на частоте 2,7 ГГц. Источник сигнала – передающая телевизионная станция, расположенная в Останкино. Во время измерений приёмное устройство с рупорной антенной сначала было установлено у окна 15-го этажа института. Затем оно перемещалось в «тень» – в комнату и холл этажа. В каждой точке приёмная рупорная антенна поворачивалась на 90°. У окна условия приёма были близки к условиям приёма в свободном пространстве. Здесь измерения показали, что *Д= – 20 дБ.*

По мере удаления точки приёма от окна внутрь помещения наблюдался многолучевой приём, а деполяризация достигала минус 6 дБ.

Таблица 13

Частота, ГГц	Значение σ, дБ		
	Жилое помещение	Офис	Помещение для торговли
1,8 … 2	8	10	10
5,2	–	12	–

Таблица 14

Частота, ГГц	Тип помещения	Среднеквадратичное значение Δ, нс		
		A	*B*	*C*
1,9	Жилой дом	20	70	150
1,9	Офис	35	100	460
1,9	Помещение для торговли	55	150	500
5,2	Офис[3]	45	75	150

Таблица 15

Тип помещения	Среднеквадратичное значение Δ, нс	
	Средние	Максимальные
Магазин радиоэлектронных устройств	15–29	40
Помещение для измерительного оборудования	31–62	60
Помещение для тяжёлого энергетич. оборудования (печи, трансформаторы)	48–90	152
Цех сварки корпусов автомобилей	19–37	150
Цех контроля и хранения автомобилей	52–57	146

Расплывание времени запаздывания сигнала. Это явление возникает из-за того, что внутри помещения к приёмной антенне, помимо прямого сигнала, приходят сигналы, отражённые и рассеянные элементами здания (стены, потолок, пол) и различными местными предметами. Если передаваемый сигнал имеет форму импульса, то отражённые дискретные сигналы вызывают сильное расширение импульса. Они сливаются, образуя суммарный импульс длительностью Δ.

Величину Δ называют обычно шириной расплывания задержки и, как правило, определяют на различных уровнях относительно максимального значения (10, 15, 20, 25 и 30 дБ). В зависимости от типа аппаратуры, порогового значения уровня используются те или иные величины Δ.

Величина Δ меняется от точки к точке, так что обычно пользуются среднеквадратичными величинами Δ на площадке диаметром в несколько длин волн. Иногда полагают, что огибающая уровня при расплывании подчиняется экспоненциальному закону, хотя уверенного подтверждения этому факту нет.

Приводятся среднеквадратичные значения ширины расплывания задержки сигнала на уровне 30 дБ, полученные в эксперименте с ненаправленными антеннами на частоте сигнала 1900 МГц (табл. 14). В колонке *A* даны наиболее часто встречающиеся низкие значения, в колонке *B* – медианные значения, в колонке *C* – редко встречающиеся экстремальные значения расширения задержки. В табл. 15 приведены результаты измерений в различных помещениях ширины расплывания задержек импульсного сигнала на частоте сигнала 937 МГц.

Из приведённых таблиц видно, что ширина расплывания задержки сигнала в помещениях лежит в пределах 5 … 500 нс. Нетрудно подсчитать, что разность хода между прямыми и отражёнными лучами в этом случае изменяется примерно от 5 до 150 м. Предполагается, что

ширина расплывания задержки не зависит от частоты в диапазоне выше 30 МГц. Однако на величину Δ влияет поляризация радиоволн и ширина ДН приёмной антенны. На трассах с прямой видимостью внутри помещений наименьшая задержка Δ получается при круговой поляризации (КП) радиоволн. Дело в том, что при отражении волн от плоских поверхностей элементов здания доминируют углы падения больше 45°, т. е. больше угла Брюстера (для большинства конструктивных материалов угол Брюстера больше 45°). Поэтому в диапазоне 1,3 … 60 ГГц вектор поляризации отражённых волн вращается в обратную сторону и слабо воспринимается приёмной антенной, настроенной на КП излучаемой волны.

Таблица 16

Ширина ДН приёмной антенны	Среднеквадратичное значение Δ в 90 % случаев, нс
ненаправленная	17
60°	16
10°	5
5°	1

В табл. 16 проиллюстрирована зависимость ширины расплывания задержки (среднеквадратичное значение) от ширины ДН приёмной антенны при ненаправленной передающей антенне. Показанная зависимость найдена по методу сложения лучей в пустом помещении офиса 1,5 х 7,8 м для частоты сигнала 60 ГГц.

Данные о расплывании задержки необходимы при проектировании высокоскоростных цифровых систем, но приведённых данных о Δ недостаточно, так как требуется статистика формы расплывания задержки. Следует с осторожностью относиться к этим данным при периоде повторения импульсов меньше Δ.

Потери сигнала при проникновении в здание определяются как разность уровней измеренных на улице и внутри здания, дБ. Такие потери, очевидно, зависят от конструкции, материала и расположения здания и, разумеется, от частоты сигнала. Поэтому измеренная величина потерь изменяется от нескольких единиц до 10 децибел. Для расчёта потерь в городе, при проникновении сигнала в здание офиса в диапазоне частот 400 … 1400 МГц, предлагается формула

$$L_o = 16 - 2N_S,$$

где N_S – номер этажа, между 0 и 8.

Следует иметь в виду, что за рубежом 1-й этаж здания считается нулевым, 2-й – первым ($N_S = 1$) и т. д.

В пригородных домах, на частотах между 200 и 1000 МГц, медианное значение потерь приникающего сигнала лежит в пределах 6 – 10 дБ.

Измерение потерь сигналов, проникающих в небольшие дома сельской местности, определялись как разность уровней сигнала, измеренных в нескольких точках внутри и вне дома на открытой местности. Измерялся сигнал от радиопередающего центра или от измерительного генератора. Вокруг домов обычно был сад (деревья и кустарники). На частотах 100 … 300 МГц потери составили примерно 11 дБ, на частотах 1 … 2,7 ГГц примерно 13 дБ.

Приведённые данные о распространении радиоволн внутри помещений имеют большой разброс, однако они могут быть использованы для ориентировочной оценки характеристик сигнала. Более точный расчёт может быть сделан, если известен план помещений здания, загрузка помещений, диапазон используемых частот и другие сведения.

Многие проблемы распространения радиоволн в зданиях требуют дальнейшего изучения для получения более надёжных статистических данных и определения более тесной связи между конкретными характеристиками помещений и статистическими параметрами сигнала, что повысит точность расчётов.

8. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ АКТИВНОСТЬ РАДИОВОЛН

Рассмотрим некоторые математические выражения, описывающие биологическую активность электромагнитных волн независимо от диапазона частот, к которому они принадлежат.

Поглощение радиоволн в биологическом объекте характеризуется отношением мощности, падающей на биообъект $P_{пад}$, к мощности, прошедшей через него, и определяется уравнением

$$P_{пад} = P_{прош} e^{2\alpha_o z}, \tag{15}$$

где α_o – постоянная затухания, а z – толщина биообъекта;

$$\alpha_o = \sqrt[4]{\varepsilon_{ср}^2 \cdot M^2 + \sigma_{ср}^2 \cdot M^2 \cdot \omega^2 \sin(\varphi/2)}, \tag{16}$$

где $\varepsilon_{ср}$ и $\sigma_{ср}$ – среднее значение диэлектрической проницаемости и электропроводности объекта, ω – частота, а

$$\varphi = arctg \frac{\sigma_{ср}}{\varepsilon_{ср} \cdot \omega}. \tag{17}$$

В соответствии с формулами (15) и (16) поглощение радиоволн (при $\omega = const$) определяется средним значением диэлектрической проницаемости и электропроводности тканей. Все среды организма, отли-

чающиеся друг от друга значениями, в биофизике принято представлять в виде 2-х групп, изменение количественного соотношения между которыми определяет различное поглощение радиоволн в данной области. К первой группе следует отнести подвижные среды (кровь, спинномозговую жидкость и воздух в легких), количество которых непостоянно для данной области биообъекта, а ко второй группе – все остальные среды (мышцы, жировые и костные ткани).

В диапазоне сверхвысоких частот диэлектрическая проницаемость и электропроводность живых тканей изменяются в зависимости от частоты электромагнитного поля. Максимальное изменение их средних значений наблюдается в той области диапазона, где разность в отмеченных выше группах будет наибольшей.

Согласно теории Дебая, изменение электрических параметров живых тканей обусловлено резонансным поглощением мощности ЭМ-поля полярными молекулами тканей, когда частота собственных колебаний молекул воды и белка несколько меньше частоты приложенного поля. Период собственных колебаний электромагнитного поля, при котором происходит максимальное поглощение мощности, рассчитывается по формуле Дебая:

$$\omega_M = \frac{12 \cdot k \cdot T}{\eta \cdot a^3}, \qquad (18)$$

где k – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура среды, a – радиус молекулы, а η – вязкость воды.

При комнатной температуре для молекул воды и белка эти частоты составляют, соответственно,

$$\omega_{\text{м}} = 2{,}8 \cdot 10^{-12}\,\text{с}^{-1}\,(\lambda = 0{,}3\,\text{см}),$$

$$\omega_{\text{м}} = 6 \cdot 10^{7}\,\text{с}^{-1}\,(\lambda = 0{,}8 - 8{,}0\,\text{м}).$$

Наряду с резонансным поглощением энергии электромагнитного поля ткани биологического объекта могут также хорошо поглощать радиоволны на частотах, на которых квант энергии электромагнитного поля соответствует одному из возможных энергетических состояний молекулы белка.

Глубина h_e, на который происходит ослабление электрического поля электромагнитной волны биологической тканью в e=2,7 раз, определяется из соотношения

$$h_e = \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{|\varepsilon'|}\,\sin(\delta/2)}, \qquad (19)$$

где ε' – комплексная диэлектрическая проницаемость;

δ – угол диэлектрических потерь живой ткани биологического объекта.

Из формулы (19) видно, что глубина проникновения поля в биологическую ткань зависит от его частоты. Так, в частности, результаты измерения на частотах 46 и 90 ГГц для мышечной ткани показывают, что эта величина составляет 0,4 мм, а для жировой ткани – 2,6 мм (на частоте f = 46 ГГц) и 1,4 мм (на частоте f = 90 ГГц).

Необходимо отметить, что на частотах $f > 1$ ГГц поглощение энергии ЭМ-поля сильно зависит от степени отражения радиоволн от поверхности тела человека. Так, в частности, в диапазоне частот (1–10) ГГц отражается приблизительно 60 % энергии падающей волны и только 40 % проникает в тело человека (как биологического объекта), нагревая его за счет поглощения.

Обратимся к рис. 13, из которого следует, что поглощение, определенное для всего тела, сильно зависит от частоты и имеет резонансную область, в которой лежит максимум поглощения энергии. Для детей эта область расположена в диапазоне частот 100–400 МГц, а для взрослых – 30–100 МГц.

Кроме того, в отдельных частях тела человека наблюдается также повышенное поглощение энергии (так называемые «горячие пятна»), в частности резонансная частота головного мозга составляет приблизительно 900 МГц.

Нормативной базой в России являются санитарные правила и нормы, а также предельно допустимые уровни ПДУ для некоторых источников ЭМП. Среди зарубежных национальных организаций, работающих в области нормирования ЭМП, следует отметить Институт американских национальных стандартов (ANSI); Британский национальный центр радиологической защиты (NRPB); Немецкий электротехнический союз (VDE).

Под предельно допустимым уровнем принимают такое значение (мощности, или напряжённости электрического поля), выше которого в организме начинают происходить необратимые процессы.

На частотах f >300 МГц величина ПДУ задается в виде плотности потока мощности. Для России это значение составляет 10 мкВт/см^2, и является наименьшим среди других развитых стран. Для сравнения ПДУ: в Швеции равно 1 мВт/см^2, а в США – 10 мВт/см^2. Столь существенные различия в ПДУ обусловлены тем, что за рубежом вредное влияние электромагнитных полей оценивается по их тепловому воздействию, а в России – по остальным шести факторам вредного воздействия, перечисленным в предыдущих разделах.

Необходимо отметить также одно любопытное обстоятельство: ПДУ микроволновых печей, изготовляемых в США, составляет

5 мВт/см^2, то есть в 500 раз превышает предельно допустимый уровень в России. Это важно учитывать при использовании в быту таких нагревательных приборов.

В более длинноволновой части спектра ($f < 300$ МГц) вредное воздействие электромагнитных полей оценивается не по величине плотности потока энергии, как это было рассмотрено в СВЧ-диапазоне длин волн, а отдельно для электрической и магнитной составляющих поля.

В настоящее время существуют сотни книг и тысячи публикаций, посвящённых рассмотрению биологической активности электромагнитных волн. В данном пособии краткий анализ этой проблемы представлен в разделе 6.

Выше отмечалось, что, в отличие от растений, человек и другие биообъекты более тонко реагируют на радиоволны. О способности СВЧ-излучателя изменять состояние человека было известно ещё до войны. К тому же периоду времени относятся и другие исследования, продемонстрировавшие негативную роль воздействия радиоволн на человека. По мнению ряда авторов, те или иные нарушения здоровья населения за счёт облучения его радиоволнами встречаются значительно чаще, чем это кажется на первый взгляд.

Поскольку женщины более чувствительны к воздействию радиоволн СВЧ-диапазона, чем мужчины, на практике это обстоятельство необходимо иметь в виду при приёме на работу лиц, связанных с облучением.

9. ЗАТУХАНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ

Взаимодействие электромагнитного поля с веществом сопровождается движением разрядов в атомах и молекулах. Возбуждение же колебаний электронов приводит к появлению в веществе собственного микрополя. Картина взаимодействия радиоволн с проводящей средой является достаточно сложной и выходит за рамки настоящего рассмотрения. Она включает в себя сложные процессы отражения и преломления радиоволн.

Кроме того, электромагнитная волна по мере своего распространения от поверхности в глубь проводящей среды быстро затухает. Этот процесс характеризуется коэффициентом затухания α или обратной ему величиной – глубиной проникновения δ. В общем случае значения α могут быть рассчитаны по формуле

$$\alpha = \sqrt{\frac{2}{\mu \cdot \mu_o \cdot \sigma \cdot \omega}}, \qquad (20)$$

из которой видно, что потери увеличиваются с ростом частоты. Если длину волны выразить в сантиметре, то глубину проникновения в микронах можно определить из соотношения

$$\delta = K\sqrt{\lambda}, \qquad (21)$$

где K – значения, равные 0,37; 0,39; 0,51; 0,71 и 1,10, соответственно, для серебра, меди, алюминия, латуни и припоя.

Глубина проникновения ЭМП, на которой напряжённость электрического поля уменьшается в e = 2,7 раза, называется скин-слоем. На частоте 50 Гц величина δ для меди составляет около 1 см, а на частоте 5 ГГц – только 1 микрон. Хорошее затухание электромагнитного поля в проводящих средах может быть использовано на практике при разработке различных экранов, обеспечивающих защиту обслуживающего персонала от вредного воздействия радиоволн.

Однако, на практике при работе в СВЧ-диапазоне длин волн эффективность экранировки плохо поддаётся расчётам, поскольку отдельные элементы экранов или конструкций зданий могут служить сами элементами возбуждения электромагнитных полей в экранируемых помещениях. На рис. 15 показаны три наиболее распространённых способа возбуждения колебаний в диапазоне сверхвысоких частот. Аналогичным образом за счёт наличия штырей, петель и отверстий происходит возбуждение электромагнитных колебаний в жилых помещениях. При этом в качестве источника излучения может быть как природный, так и техногенный электромагнитный фон.

На производстве или в быту ситуация, аналогичная той, что представлена на рис. 15, может возникнуть, например, в крупнопанельных домах, в кабинах радиолокационных станций и т. д. По этой причине для проверки эффективности защиты обслуживающего персонала необходимо производить замеры уровней облучения сотрудников непосредственно на рабочих местах. Что касается населения, то сделать это более сложно, чем для работающего персонала.

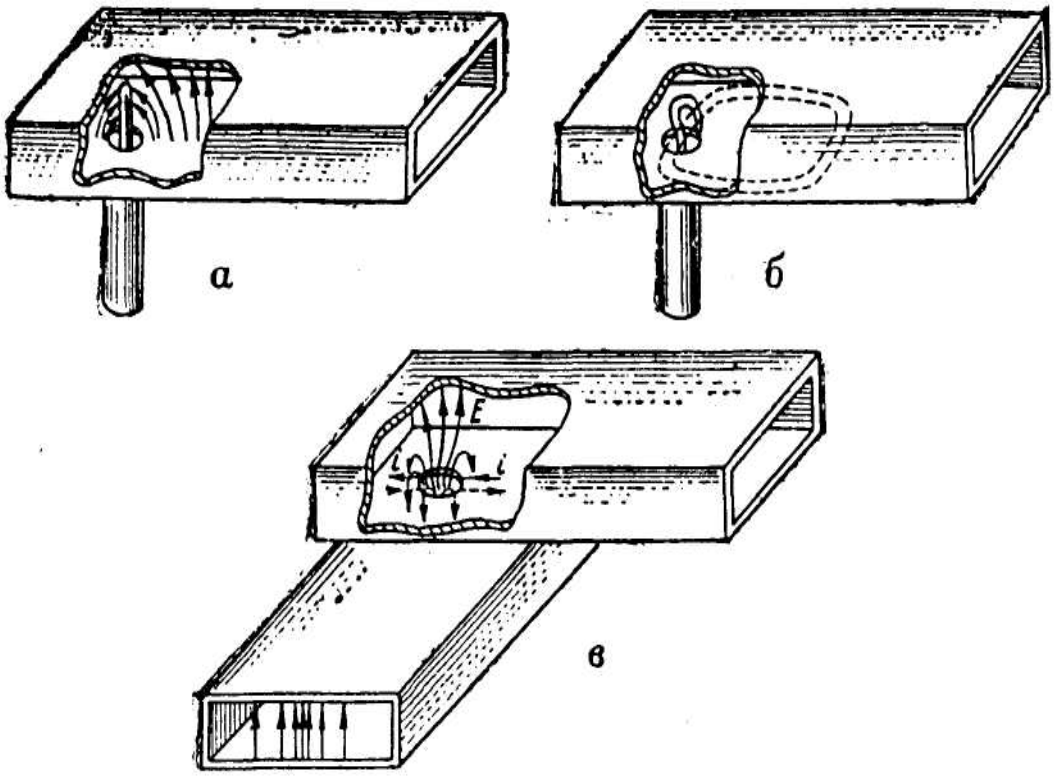


Рис. 15. Способы возбуждения электромагнитного поля в СВЧ-диапазоне длин волн: а – штырём; б – петлёй; в – отверстием связи

10. ЗАЩИТА И ПРОФИЛАКТИКА ПОРАЖЕНИЙ РАДИОВОЛНАМИ

Сложность защиты человека от действия электромагнитных волн и обеспечения профилактики поражений, вызываемых ими, обусловлена тем, что этот специфический вид загрязнения окружающей среды не имеет ни цвета, ни запаха, а может быть обнаружен лишь с помощью специальной измерительной аппаратуры. Причём регистрация радиоизлучения возможна лишь в момент работы источника радиоволн. Задача регистрации электромагнитного фона усложняется ещё и тем обстоя-

тельством, что для каждого диапазона частот необходимо иметь свою регистрирующую аппаратуру, обладающую хорошей широкополосностью и высокой чувствительностью (что накладывает определённые ограничения как на геометрические размеры приёмной антенны, так и на выбор типа приёмника).

В случае регистрации радиоизлучения в производственных помещениях задача в какой-то мере упрощается, поскольку обычно известны частоты, на которых работает радиоаппаратура (даже на режимных предприятиях). Что касается бытовых условий, то в этом случае поиск диапазона частот, в котором возникает электромагнитный фон, значительно затруднён неопределенностью, как числа самих излучателей, так и частот, на которых они работают. Кроме того, если облучение персонала на производстве происходит только в рабочее время, то население может облучаться каким-либо ведомством в соответствии с неизвестным графиком работы его предприятий.

Современные радиолокационные станции большой мощности могут создавать на значительном удалении от мест своего размещения электромагнитные поля, интенсивность которых в десятки-сотни раз превышает предельно допустимые уровни. Однако у населения не имеющее отношения к работе радиолокационных станций, уровень Электромагнитных полей может быть значительно выше, чем лиц, непосредственно связанных с излучениями на производстве. Кроме того, при контроле состояния здоровья не работающих с генераторами радиоволн, никто не обращает внимание на отрицательное влияние для них электромагнитного фона.

Табл. 7 содержит санитарно-гигиенические нормативы воздействия электромагнитных излучений для персонала и населения, а также предельно допустимые величины ЭМ энергии и размеры санитарно-защитных зон для различных диапазонов частот. В их основе лежат нормативы, принятые ещё в бытность существования СССР, и справедливые в настоящее время для Российской Федерации. Не будем анализировать содержание этих таблиц. Вдумчивый читатель может сделать это самостоятельно. Остановимся лишь на мероприятиях, входящих в профилактику поражений, вызываемых СВЧ-полями, поскольку этот диапазон длин волн является наиболее опасным для человека и других биообъектов. Важнейшими из них являются следующие:

а) создание зон безопасности;

б) экранирование прилегающих жилых зданий или отдельных помещений;

в) размещение радиопередающих антенн на высоту, которая обеспечивает широкую «мёртвую зону».

Выполнение этих мероприятий (по формальным признакам) исключает, точнее – ослабляет, воздействие на человека радиоволн. Однако из предыдущего рассмотрения следует, что избежать вредного влияния электромагнитного фона практически не удаётся никому.

Профилактика поражений у профессионалов на рабочих местах ведётся в двух направлениях: с одной стороны, ослабление интенсивности электромагнитного фона техногенного происхождения, с другой – укрепление здоровья работающих (за счёт надбавок за вредность к заработной плате, сокращённого рабочего дня, более ранних сроков выхода на пенсию и, наконец, получения дополнительного спецпитания). В комплекс последнего направления профилактики входят также мероприятия, направленные по возрастному (старше 18 лет) и половому (преимущественно мужчины) подбору работающих на установки с СВЧ-излучением.

10.1. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ О БИОЛОГИЧЕСКОМ ДЕЙСТВИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Природные ЭМП – естественные синхронизаторы ритмов организма. В то же время в периоды солнечных вспышек, когда радиоизлучение Солнца возрастает в 1000 и более раз, данные природные ЭМП фактически выступают в роли десинхронизатора, и у ослабленных людей (с зауженной зоной толерантности) могут обостряться сердечно-сосудистые, психические и другие заболевания.

Техногенные ЭМП, особенно когда их информационные характеристики близки к аналогичным характеристикам биоэлектрической активности органов человека, определённо приводят к десинхронизации функциональных процессов в организме.

Биологический эффект воздействия ЭМП зависит от его частоты, интенсивности, продолжительности характера и режима облучения, это уже подробно рассматривалось в предыдущих разделах. ЭМП может усилить тепловое движение молекул в живой ткани. Это приводит к повышению температуры тела и может вызвать такие вредные последствия, как ожоги, катаракты, нарушения нормального развития утробного плода. Не исключена вероятность разрушения сложных биологических структур (например, клеточных мембран). То есть: возможны последствия более тонкие, чем простое повышение температуры, хотя экспериментальных свидетельств этого пока не достаточно.

Экспериментального материала больше собрано по радиочастотному диапазону. Установлено, что плотности потока энергии больше

100 мВт/см^2 ведут к тепловому повреждению и к развитию катаракты в глазу, при 10–100 мВт/см^2 наблюдались изменения, обусловленные термическим стрессом, включая аномалии у потомков, при 1–10 мВт/см^2 отмечались изменения в иммунной системе. В диапазоне от 1 до 100 мкВт/см^2 достоверно не установлено почти никаких последствий.

Имеются данные о том, что рабочие, длительно работающие в условиях воздействия микроволн или живущие рядом с ЛЭП, могут быть больше подвержены раку, лейкемии, опухолям мозга, рассеянному склерозу и другим тяжёлым заболеваниям. Наиболее чувствительными к воздействию радиоволн являются нервная и сердечно-сосудистая системы.

Клиническая картина хронического действия ЭМП радиочастот такова: сначала появляется головная боль, повышенная утомляемость, раздражительность, нарушение сна, боли в области сердца. Позднее отмечается усиление жалоб: лёгкая возбудимость, нарушение сна, снижение памяти, приступообразные головные боли, головокружения, обмороки, сжимающие боли в области сердца, сужение артерий сетчатки.

В момент приступа наблюдается дрожь, побледнение (покраснение) лица, резкая слабость, нередко повышение температуры тела, подъём артериального давления.

При воздействии СВЧ-излучения развитие катаракты возможно как при кратковременном облучении, так и при длительном воздействии невысоких уровней облучения. Для крови характерна вероятность возникновения лейкоцитоза, возможны изменения со стороны эндокринной системы (гиперфункция щитовидной железы, нарушение функции половых желез).

10.2. НОРМИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Для оценки уровня ЭМП используются разные характеристики ЭМП: в диапазоне 0–300 МГц используется электрическая и магнитная напряжённость ЭМП (Е и Н, В/м, А/м), в диапазоне 0,3–300 ГГц – плотность потока энергии (ω, Вт/м^2 или мкВт/см^2). Для измерения напряжённости ЭМП используют прибор ИЭМП с дипольной и рамочной антеннами и преобразователями для измерения напряжённости в разных частотных диапазонах, для измерения мощности излучения – прибор ОП-1, снабжённый термисторной головкой и рупорными антеннами.

В настоящее время допустимо считать, что биологический эффект ЭМП в диапазоне 0,3–300 ГГц слабо зависит от частоты, поэтому обсу-

ждение различных аспектов нормирования в этом диапазоне ведётся на примере СВЧ-полей.

СВЧ-поля проникают в биообъекты на глубину, равную 1/40 длины волны, поэтому сантиметровые и миллиметровые волны поглощаются в основном кожей, при этом большая часть энергии выделяется в виде тепла. Излучения с большими длинами волн проникают глубже и влияют на внутренние органы.

В части биологической эффективности СВЧ-полей достаточно надёжно известно следующее:

1. При ω до 10 мкВт/см^2 стойких генетических нарушений нет.

2. При $\omega \geq 100$ мкВт/см^2 бионарушения связаны с повышением температуры тела, особенно нагреваются бессосудистые органы: хрусталик (последствия – катаракта), семенники (импотенция) и т.д., нарушаются также обменные процессы в центральной нервной системе.

3. Тяжесть биоповреждений при воздействии СВЧ-полей в нетепловом диапазоне пропорциональна длительности облучения и степени напряжения адаптационных механизмов к другим факторам среды. При хроническом воздействии нетепловых доз СВЧ-излучения наблюдаются головные боли, быстрая утомляемость, неврозы, нарушения сна, артериального давления, сердечно-сосудистой деятельности, состава крови.

Логика нормирования СВЧ-полей: под ПДУ следует понимать минимальную ω, выше которой в организме возникают стойкие функциональные изменения. Так, для излучения с $\lambda = 10$ см такие нарушения установлены при $\omega > 1000$ мкВт/см^2. Взяв коэффициент запаса, равный 10, можно определить, таким образом, предельно допустимый уровень ПДУ: 100 мкВт/см^2.

Согласно ГОСТ 12.1.006–84 для персонала ПДУ определяется по формуле

$$ПДУ = \frac{W}{t}\ , \qquad (22)$$

где W – нормированное значение допустимой энергетической нагрузки; $W = 200$ мкВт·ч/см^2 для всех случаев облучения, кроме случая вращающихся и сканирующих антенн, когда $W = 2000$ мкВт·ч/см^2; t – время пребывания в зоне облучения. Однако значения ПДУ не должны превосходить 1000 мкВт/см^2 в любых случаях, а при наличии рентгеновского излучения (в пределах норм радиационной безопасности) или температуры выше 28°С ПДУ не должен превосходить 100 мкВт/см^2. Например, по 22, для случая вращающихся или сканирующих антенн, $W = 2000$ мкВт·ч/см^2, для $t = 0{,}1$ величина ПДУ = 2000 (мкВт·ч/см^2)/

0,1ч = 20000 мкВт/см^2, но этот уровень СВЧ-поля недопустим, так как он ограничен величиной 1000 мкВт/см^2.

Утверждённые в 1996 Госсанэпиднадзором РФ Санитарные правила и нормы – “Электромагнитные излучения радиочастотного диапазона” в целом подтверждают изложенные позиции нормирования СВЧ-полей по ГОСТ 12.1.006–84.

Напоминаем, что всё изложенное выше по нормированию ЭМИ для диапазона 0,3 – 300 ГГц относится к персоналу, или к рабочей зоне.

Таблица 17

Предельно допустимые значения энергетической экспозиции

Диапазон частот	По электрической составляющей $ЭЭ_{э\ ПДУ}$, $(В/м)^2 \cdot ч$	По магнитной составляющей $ЭЭ_{м\ ПДУ}$, $(А/м)^2 \cdot ч$	По плотности потока энергии $ЭЭ_{ППЭ\ ПДУ}$, (мкВт/см^2) ч
30кГц ... 3МГц	20000	200	
3МГц ... 30МГц	7000	не разработаны	
30МГц ... 50МГц	800	0,72	
50МГц ... 300МГц	800	не разработаны	
300МГц ... 300ГГц			200

Для территории жилой застройки, мест отдыха, рабочих помещений, рабочих мест лиц до 18 лет и беременных женщин ПДУ составляет 10 мкВт/см^2, а для случая облучения населения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования, – 100 мкВт/см^2.

Таблица 18

Максимально допустимые значения интенсивности ЭМИ

Величина единицы измерения	Диапазон воздействия ЭМИ			
	30 кГц ... ...300 МГЦ	3 МГц ... ...30 МГц	30 МГц ... ...300 МГЦ	300 МГц ... ...300 ГГц
$Е_{ПДУ}$, В/м	500	396	80	
$Н_{ПДУ}$, А/м	50	3	3 (для 30...50 МГц)	
$ППЭ_{ПДУ}$, мкВт/см^2				1000

Для всего диапазона радиочастотных ЭМИ (300 МГц ... 300 ГГц) значения предельно допустимых энергетических экспозиций по элек-

трической и магнитной составляющей, а также по плотности потока энергии (соответственно $ЭЭ_{э\ ПДУ}$, $ЭЭ_{м\ ПДУ}$, $ЭЭ_{ППЭ\ ПДУ}$) для персонала представлены в табл. 17, максимально допустимые значения интенсивности ЭМИ для персонала – в табл. 18.

ПДУ ЭМИ радиочастот для населения приведены в табл. 19 и 20.

Таблица 19

ПДУ ЭМИ для населения

Места нахождения людей	Участок диапазона, единица измерения				
	30 кГц ... ...300 кГц, В/м	0,3 МГц ... ...3 МГц, В/м	3 МГЦ ... ...30МГЦ, В/м	30 МГц ... ...300 МГц, В/м	300 МГц ... ...300 ГГц, мкВт/см^2
Территория жилой застройки, места отдыха, рабочие помещения, рабочие места лиц до 18 лет и беременных женщин	25	15	10	3*	10 100**

Примечание: * – кроме телевизионных (см. табл. 20) и радиолокационных станций, работающих в режиме кругового обзора (сканирования);
** – для случаев облучения от антенн, работающих в режиме кругового обзора или сканирования.

Таблица 20

ПДУ ЭМИ радиочастот, создаваемые телевизионными станциями

Частота ТВ-станции, МГц	48,4	88,4	192	300
Напряжённость, Е (В/м)	5,4	4,0	3,0	2,5

Низкочастотные ЭМП (0–10 кГц) представляют собой значимый экологический фактор. Так, геомагнитное поле (ГМП) защищает живое вещество планеты от электрически заряженных частиц космического происхождения, существенное изменение ГМП может привести к дестабилизации биосферы, причём не на энергетическом, но на информационном уровне, например: сезонная миграция большого числа разнообразных животных связана с их способностью ориентироваться по силовым линиям ГМП.

Низкочастотные магнитные поля, в связи с практическим отсутствием ослабления тканью живого вещества, оказывают влияние на все органы, ткани, клетки, молекулы биообъекта. Так, хроническое воздей-

ствие магнитного поля 50 Гц напряжённостью около 64 А/м приводит к возрастанию летальности лабораторных животных (на 20 %) и к напряжению адаптационных процессов в системе надпочечных желёз, снижению половой потенции у самцов белых мышей. Низкочастотные электрические поля экранируются и ослабляются живыми организмами, но отрицательно влияют на физиологическое состояние животных: поражается кожа, волосяной покров, семенники, стимулируется развитие онкозаболеваний, импотенции, стерильности.

В качестве ПДУ ЭМП 50 Гц приняты следующие значения напряжённости электрического поля, кВ/м:

- в жилых помещениях – 0,5;
- в зоне жилой застройки – 1,0;
- в населённой местности, вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зелёные зоны, земли посёлков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населённых пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов – 5;
- на участках пересечения ЛЭП с автомобильными дорогами I–IV категорий – 10;
- в ненаселённой местности (незастроенные местности, даже часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельхозугодия) – 15;
- в труднодоступной местности (не доступной для транспорта и сельхозмашин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения, 20 кВ/м.

Для зон около радиотехнических объектов и телевизионных станций СВЧ-диапазона в основу нормирования положены «Санитарные правила ...».

При одновременном воздействии нескольких источников суммарное значение параметров ЭМП, например напряжённости электрической составляющей ЭМП, определяется из соотношения

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + ... + E_n^2} \ , \qquad (23)$$

где E_1, E_2, ... , E_n – напряжённости электрического поля, создаваемые каждым передатчиком в контролируемой точке данного диапазона, В/м.

Суммарная плотность потока энергии, ω, от n источников на прилегающей территории для диапазона частот ЭМИ 0,3–300 ГГц равна:

$$\omega = \omega_1 + \omega_2 + ... + \omega_n \ . \qquad (24)$$

При наличии нескольких источников излучения, работающих в разных радиочастотных диапазонах, напряжённость полей E_1, E_2 ..., E_n,

создаваемые n источниками ВЧ, и плотность потоков энергии ω_1, ω_2, ... ω_n, создаваемые N источниками СВЧ на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ) должны соответствовать требованию

$$\left(\frac{E_1}{E_{ПДУ_1}}\right)^2+\left(\frac{E_2}{E_{ПДУ_2}}\right)^2+\ldots+\left(\frac{E_n}{E_{ПДУ_n}}\right)^2+\frac{\omega_1}{\omega_{ПДУ_1}}+\frac{\omega_2}{\omega_{ПДУ_2}}+\ldots+\frac{\omega_n}{\omega_{ПДУ_n}}\le 1. \qquad (25)$$

10.3. ЗАЩИТА ПЕРСОНАЛА ОТ РАДИОВОЛНОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Защита персонала от радиоволнового облучения производится путём экранирования, ограничения мощности источника, сокращением времени работы в условиях облучения, увеличением расстояния между работающим и источником. При планировании работ намечаются нужные мощности источника и расстояния, чтобы не превышать допустимого уровня при длительной работе. Эффективное средство защиты – дистанционное управление излучателем. При работе с излучателем заранее известной мощности и при известном расстоянии необходимо определить допустимое время работы, чтобы не было переоблучения.

Эффективна защита экранами, наиболее рационально экранирование генераторов и фидерных линий. Рабочие места экранируют поглощающими сетчатыми и эластичными экранами. Индивидуальные средства: защитная одежда, защитные очки, халаты, отражающие ЭМП.

Защита от ЭМИ 50 Гц осуществляется экранированием поля и ограничением времени пребывания в нём.

При кратковременной работе в условиях действия электрических и магнитных полей (табл. 21) рекомендуются следующие граничные значения: безопасные напряжённости – 30 кВ/м (пребывание в электрическом поле до 2 ч в сутки), 10^4 А/м (пребывание в магнитном поле 5 мин в час по нормам DIN VDE 0848); допустимые напряжённости – 10 кВ/м и 800 А/м (пребывание в обоих полях несколько часов в сутки по нормам B03, RPA). Данные предельные значения отличаются от нормативов РФ: допускается длительное пребывание в поле напряжённостью до 5 кВ/м, не разрешается пребывание в поле с напряжённостью более 25 кВ/м без защитных средств; в интервале напряжённостей от 5 до 20 кВ/м время пребывания t ограничивается в соответствии с формулой

$$t=\frac{50}{E}-2\ (час), \qquad (26)$$

где E (кВ/м) – напряжённость электрического поля.

Таблица 21

Электрические и магнитные поля напряжённостью 50 Гц разных объектов

Наименование параметра или объекта	Напряжённость электрического поля, В/м	Напряжённость магнитного поля, А/м
ОРУ 500, 750 кВ ЛЭП 380 кВ ЛЭП 330 кВ ВЛ 6 – 35 кВ	10^3 ... $5\cdot10^4$ 10^3 ... 10^4 10^3 ... $5\cdot10^3$ 10 ... $5\cdot10^2$	10 ... 100 1 ... 4 10 ... 100 0,1 ... 2
Шинный мост 6 кВ	10^3	40 ... 100
ЗРУ 6 кВ	–	200
Жилые помещения	1 ... 100	0,01 ... 0,5
Электробытовые приборы	5 ... 500	0,1 ... 300
Порог индивидуальной восприимчивости	10^4 ... $2\cdot10^4$	$3\cdot10^3$ ... $3\cdot10^4$
Электрическая прочность воздуха	$5\cdot10^5$ – $3\cdot10^6$	–
Расчётные и экспериментальные безопасные напряжённости по условиям возбуждения клеток организма	$2\cdot10^4$	$4\cdot10^3$
Нормативные напряжённости по данным ВОЗ, IRPA, с учётом других возможных воздействий на организм	$5\cdot10^3$	80
То же, по данным DIN VDE 0848	$7\cdot10^3$	320

ПДУ напряжённости магнитного поля 50 Гц в зависимости от продолжительности и режима воздействия (непрерывный или прерывистый) находятся в пределах 1,4 ... 10 кА/м. Перспективные методы защиты персонала от воздействия импульсных ЭМИ: использование частотно-избирательных пространственно распределённых аттенюаторов, широкополосных согласующих устройств, поглощающих подстилающих поверхностей, индивидуальной защитной одежды (комбинезоны и халаты из металлизированной ткани; очки марки ЗП5-90), электрогерметизации элементов схем, блоков, узлов и установки в целом, экранирования рабочего места, увеличения высоты подвеса фазных проводов ЛЭП, уменьшения расстояния между ними и др.

10.4. МЕРОПРИЯТИЯ ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ ОТ ЭМИ

Трудностей при защите населения не меньше, а возможно, и больше, чем для лиц, связанных с ЭМИ на производстве, – отсутствие надёжного экранирования от ЭМИ, высокая степень влияния на формирование ЭМИ металлических переотражающих предметов, соизмеримость размеров тела и органов человека с долями длин излучаемых волн, эффект кумуляции и др. непосредственно отражаются на здоровье человека.

Основной путь защиты от ЭМИ в окружающей среде – защита расстоянием. Для соблюдения нормативных ПДУ для ЭМИ в населённой местности планировочные решения при размещении радиотехнических объектов (РТО) выбирают с учётом мощности передатчиков, характеристики направленности, высоты размещения и конструктивных особенностей антенн, рельефа местности, функционального значения прилегающих территорий, этажности застройки. Площадка РТО оборудуется согласно строительным нормам и правилам, на её территории не допускается размещение жилых и общественных зданий. Для защиты населения от воздействия ЭМИ устанавливаются – при необходимости – санитарно-защитные зоны (СЗЗ) и зоны ограничения застройки. Внешняя граница СЗЗ определяется на высоте 1,8–2 м от поверхности земли по нормативным ПДУ. Зона ограничения застройки – территория, где на высоте более 2 м от поверхности земли превышается нормативный ПДУ. Внешняя граница этой зоны определяется по максимальной высоте зданий перспективной застройки, на уровне верхнего этажа которых уровень ЭМИ не превышает нормативного ПДУ.

Размеры СЗЗ и зоны ограничений определяют по методикам Правил СН 2963–84, границы зон уточняют на основе измерений при приёмке объекта в эксплуатацию.

В табл. 22 представлены размеры СЗЗ типовых передающих радиостанций.

В табл. 23 приведены размеры СЗЗ типовых телецентров и телевизионных ретрансляторов.

В табл. 24 приведены размеры СЗЗ типовых радиолокационных станций.

В табл. 25 приведены размеры СЗЗ и расстояния от границы населённых пунктов до высоковольтных ЛЭП.

Таблица 22

Размеры СЗЗ типовых передающих радиостанций

Мощность одного передатчика, кВт	Наименование объекта	Санитарно-защитная зона, м
1	2	3
Малой мощности – до 5	Длинноволновые Средневолновые Коротковолновые	10 20 175
Средней мощности – от 5 до 25	Длинноволновые Средневолновые Коротковолновые	10–75 20–150 175–400
Большой мощности – от 25 до 100	Длинноволновые Средневолновые Коротковолновые	75–480 150–960 400–2500
Сверхмощные – свыше 100	Длинноволновые Средневолновые Коротковолновые	Более 480 Более 960 Более 4500

Таблица 23

Размеры СЗЗ типовых телецентров и телевизионных ретрансляторов

Мощность одного передатчика, кВт	Количество программ	Суммарная мощность объекта с учётом УКВ и ЧМ вещания, кВт	Санитарно-защитная зона, м
Малой мощности – до 5/2,5	Одна	до 10	В пределах технической территории
Средней мощности– до 25/6,5	Одна	до 75	200–300
Большой мощности – до 50/15	Две	до 160	400–500
Сверхмощные – свыше 50/15	Три	порядка 200	500–1000

Таблица 24

Размеры СЗЗ типовых радиолокационных станций

Наименование радиолокационной станции	Высота установки антенны, м	Санитарно-защитная зона, м
Метеорологические локаторы	12,0	3000
МРЛ – 1,2	8,0	300
Метеорит – 2	8,0	250
Метеорит – 1	4,5	350
Метеорит	12,0	2700
МРЛ-5: 2-й канал	12,0	5000
1-й канал		
РМП – 1	12,0	28000
АРС – 3м	12,0	4000
Радиодождь: 1-й канал	12,0	1600
2-й канал	12,0	3600
СОН – 4	12,0	700
РМП – 2	12,0	500
АРС – 3	4,5	400
Обзорные радиолокаторы типа «Сатурн»	8,5	3000 при нулевом угле наклона антенны

При проектировании жилых и административных зданий, расположенных в зоне действия ЭМИ, учитывается экранирующая способность строительных конструкций. Так, ЭМИ с длиной волны $\lambda = 3$ см при прохождении кирпичной стены толщиной 70 см ослабляется на 21 дБ, то есть плотность потока мощности уменьшается более чем в 100 раз.

Напряжённость ЭМП ЛЭП может быть уменьшена удалением жилой застройки от ЛЭП, применением экранирующих устройств (железобетонные заборы), посадкой деревьев и кустарников высотой не менее 2 м.

Машины и механизмы на пневматическом ходу, находящиеся в СЗЗ ЛЭП, должны быть заземлены, например, посредством металлической цепи, соединённой с кузовом (рамой) машины и касающейся земли.

Напряжённость электрического поля в зданиях, оставляемых в СЗЗ высоковольтных ЛЭП напряжением свыше 330 кВ и имеющих неметаллическую кровлю, может быть снижена установкой заземлённой металлической сетки на крыше зданий; заземлять сетку необходимо в

двух местах. Если кровля здания металлическая, её также заземляют в 2-х местах. Сопротивление заземления не нормируется.

Таблица 25

Размеры СЗЗ и расстояния от границы населённых пунктов до высоковольтных ЛЭП

Расстояние, м	Напряжение высоковольтных ЛЭП, кВ
1. Размеры ССЗ (при напряжённости более 1 кВ/м):	
75 (20*)	330
150 (30)	500
250 (40)	750
300 (55)	1150
2. До границы населённых пунктов:	
250	750
300	1150

Примечание: * – значения в скобках допускаются в сельской местности при ограничении длительности работ, заземлении машин, инструктаже населения.

При проведении строительно-монтажных работ в СЗЗ ВЛ необходимо заземлить протяжённые металлические объекты (например, трубопроводы) не менее чем в 2-х точках; сопротивление заземления не нормируется.

В период проведения сельскохозяйственных и других работ вблизи ЛЭП лица, ответственные за организацию работ, должны провести инструктаж с работающими и обеспечить выполнение мер защиты от ЭМП, которые регламентированы Санитарными нормами и правилами.

На территории СЗЗ ЛЭП при напряжении 750 кВ и выше запрещено выполнение сельскохозяйственных и других работ лицами в возрасте до 18 лет.

Для ограничения уровня ЭМП, воздействующих на окружающую среду, могут быть использованы средства, указанные в ГОСТ 12.1.006–84 и применяемые для уменьшения уровня ЭМП в цехах предприятий: экранирование оборудования, специальная облицовка потолка и стен рабочих помещений на основе материалов с большим содержанием углерода. Для снижения излучаемой мощности поля важен правильный выбор типа оборудования, генерирующего ЭМИ.

При эксплуатации техники высоких и сверхвысоких частот важно обеспечить надёжную радиогерметизацию разъёмных и неразъёмных

соединений. В настоящее время для этого используются полимерные ферромагнитные материалы.

Появились новые средства ЭМ-защиты и профилактики. Среди наиболее доступных и эффективных следует считать: оснащение помещений аппаратами аэроионопрофилактики «Элион-132», установку на экраны новейших отечественных экранов «Синко», применение специальных спектральных очков для постоянной работы, приём витаминных препаратов (например, «Золотой шар», «Нагипол»).

Совокупность этих средств позволит уменьшить вероятность нервно-психических расстройств, стрессов, сбоев, замкнутости, вредного действия всех видов электромагнитных полей.

10.5. ДОПУСТИМЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НЕИОНИЗИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ ДЛЯ ПЭВМ

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	10 В/м
Напряженность электромагнитного поля по магнитной составляющей на расстоянии 50 см от поверхности видеомонитора	0,3 А/м
Напряженность электростатического поля не должна превышать:	
– для взрослых пользователей	20 кВ/м
– для детей дошкольных учреждений и учащихся средних специальных и высших учебных заведений	15 кВ/м
Напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг ВДТ по электрической составляющей должна быть:	
– в диапазоне частот 5–2 кГц;	25 В/м
– в диапазоне частот 2–400 кГц	2,5 В/м
Плотность магнитного потока должна быть:	
– в диапазоне частот 5–2 кГц;	250 нТл
– в диапазоне частот 2–400 кГц	25 нТл
Поверхностный электростатический потенциал не должен превышать	500 В

10.6. ПРОФИЛАКТИКА ПОРАЖЕНИЯ РАДИОВОЛНАМИ

Ослабление интенсивности воздействия излучения достигается путём использования защитных материалов, отражающих либо поглощающих электромагнитные волны. Выбор материалов и вид защиты обслуживающего персонала определяется конкретными условиями работы и зависит от характеристик излучения (частоты, мощности, типа электромагнитных колебаний, стационарной или импульсной работы источника излучения и пр.). Отметим лишь, что к материалам, отражающим радиоволны, относятся листы и сетки, выполненные из металла, а к материалам, поглощающим радиоволны, – вода, земля, стекло и другие, а также вещества или предметы, содержащие элементы-поглотители радиоволн, например растения или деревья (за счёт воды, входящей в их состав). С этой точки зрения для защиты жилых помещений от радиоволн полезно использование вьющихся растений, одновременно украшающих и фасады зданий.

На особо опасных производствах для защиты организма работающего от воздействия радиоволн используются защитная одежда и защитные очки. Такая одежда изготовляется из специальной ткани, содержащей тонкие металлические нити, которые образуют мелкоячеистую сетку, а защитные же очки имеют стёкла с тонким покрытием из металла, которое является прозрачным в видимом диапазоне длин волн.

С целью исключения возможности работы с источником СВЧ-излучений лиц, имеющих какие-либо отклонения в здоровье, все кандидаты на эту работу проходят предварительное медицинское освидетельствование (согласно приказу Министра здравоохранения СССР № 136М от 7 сентября 1957 г.).

Раз в год работающие с источниками СВЧ-излучений обязаны проходить всесторонние медицинские осмотры, основная цель которых состоит в выявлении начальных признаков ухудшения здоровья работающих. На основании результатов таких осмотров даётся заключение о возможности продолжения работы или необходимости перевода работающего на другую работу, не связанную с СВЧ-излучением.

К сожалению, приходится констатировать, что профилактические мероприятия, связанные с вредным действием радиоволн, являются менее чёткими и строгими, нежели при работе с радиоактивными веществами. Это обстоятельство не позволяет всегда вовремя обнаружить вредное действие радиоволн на рабочих местах.

Практически все нормативные документы, касающиеся защиты населения и работающих от радиоволн, в Российской Федерации в настоящее время фактически полностью повторяют те, что имели силу,

когда существовал Советский Союз. Аналогичными нормативно-правовыми документами руководствуются и в других странах СНГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вопросы, затронутые в предлагаемом учебном пособии, дают лишь общие представления о причинах появления электромагнитного фона, характере его воздействия на человека и другие биообъекты.

По каждому разделу имеется обширная литература, которая более глубоко раскрывает ту или иную проблему, непосредственно связанную с электромагнитным загрязнением окружающей среды, или же описывает мероприятия, проведение которых обеспечивает профилактику поражений, вызываемых электромагнитным излучением. Читатели и автор пособия прекрасно понимают, что избежать влияния электромагнитного загрязнения среды невозможно, однако ослабить его действие, или даже поставить под контроль, является насущной задачей человека. Издержки, связанные с прогрессом и научно-технической революцией, влияют на наше здоровье и вызывают определённый дискомфорт. Однако мы не в состоянии затормозить развитие мировой цивилизации. Поэтому задача современного жителя Земли состоит в том, чтобы понять те последствия, которые связаны с антропогенным фактором и каким-то образом не допустить значительного превышения техногенного электромагнитного фона над природным.

Сейчас, с уходом в прошлое эпохи «холодной войны», не произошло сокращения различных видов вооружений и значительного уменьшения расходов на разработку и испытание различных систем, основанных на использовании электромагнитного излучения большой мощности. Это обстоятельство вызывает беспокойство за сохранение определённой стабильности техногенного электромагнитного фона производственного характера. Что касается бытового электромагнитного фона, то в 90-е годы также наметилась тенденция к его стабилизации, поскольку мощными передатчиками теле- и радиовещания уже охвачена большая часть земного шара. Однако широкое использование сотовой связи нарушает этот баланс.

Сам факт увеличения в два раза продолжительности жизни практически во всех странах мира доказывает, что мировой прогресс, наряду с негативными последствиями, оказал существенное влияние на качество жизни и её продолжительность. Однако необходимо помнить, что существует опасность разрушения природной среды за счёт вмешательства в неё человека.

В отличие от радиоактивного, электромагнитное загрязнение окружающей среды исчезает сразу же после ликвидации источника излучения. Это обстоятельство позволяет осуществлять более строгий учёт и контроль за вводом в эксплуатацию и действием источников электромагнитного излучения, а также более эффективно проводить мероприятия, связанные с профилактикой поражений.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Раскройте понятие «электромагнитное поле».
2. Что представляют собой электромагнитные волны?
3. Что понимают под процессом распространения электромагнитных волн?
4. Каким образом можно представить сложный колебательный процесс?
5. В чём измеряется частота электромагнитных колебаний?
6. Запишите связь между частотой и периодом колебаний, а также между длиной волны и частотой.
7. Объясните принцип, по которому можно условно разбить спектр электромагнитных колебаний.
8. Перечислите основные диапазоны частот с указанием их условных границ.
9. Перечислите единицы измерений электрических и магнитных полей в системе СИ.
10. Попробуйте вспомнить единицы измерений электрических и магнитных полей в других системах.
11. Каким образом можно условно разбить электромагнитный фон по своему происхождению?
12. Перечислите основные источники природного электромагнитного фона.
13. Проведите классификацию природного электромагнитного фона.
14. Перечислите основные источники техногенного электромагнитного фона.
15. Объясните понятие «электромагнитное загрязнение окружающей среды».
16. Каковы тенденции изменения уровня техногенного электромагнитного фона?
17. Что такое объёмный резонатор?
18. Раскройте понятие «добротность резонатора».

19. Может ли закрытое помещение играть роль объёмного резонатора, каковы должны быть соотношения между длиной волны генерируемых колебаний и размерами такого помещения?
20. Объясните понятие «плотность потока энергии (ППЭ)».
21. Что такое волновой фронт?
22. Перечислите факторы, влияющие на дальность распространения радиоволн.
23. Какова связь между напряжённостью электрического поля и мощностью источника излучения?
24. Объясните, в чём отличие изотропного излучателя от неизотропного.
25. Что понимают под биологической активностью на макроуровне?
26. Объясните, в чём проявляется биологическая активность на микроуровне.
27. Зависит ли эффективность воздействия электромагнитных колебаний от их частоты, и каким образом?
28. Перечислите основные жалобы, которые характерны для лиц, подвергающихся длительному воздействию СВЧ-излучения.
29. Просмотрите внимательно табл. 5 и сравните, у кого выше нормы облучения – у работающих или у населения?
30. Как изменяются предельно допустимые значения с увеличением частоты облучения?
31. Используя табл. 5, сравните единицы измерений допустимых уровней облучения в зависимости от частоты.
32. Как вы думаете, почему предельно допустимые уровни для жилых помещений практически на порядок ниже, чем для жилой застройки?
33. Где выше ПДУ напряжённости электрического поля – внутри жилых зданий или просто в населённой местности?
34. Зависит ли величина санитарно-защитной зоны от напряжённости высоковольтных линий?
35. Как изменяется величина санитарно-защитной зоны в зависимости от диапазона частот? (При ответе используйте табл. 7).
36. Перечислите основные трудности, связанные с регистрацией радиоизлучения.
37. Назовите основные мероприятия, обеспечивающие профилактику заболеваний, вызванных СВЧ-полями.
38. Перечислите перечень мероприятий, направленных на уменьшение воздействия излучения СВЧ-диапазона радиоволн на рабочих местах.

39. Какие материалы и вещества наиболее хорошо поглощают радиоволны.
40. Подумайте, зависит ли эффективность защиты от радиоволн от размеров ячеек металлической сетки, и если да, то почему?
41. Зачем необходимо предварительное медицинское освидетельствование лиц, поступающих на работу с источниками СВЧ-излучения?
42. Какова периодичность профосмотров для лиц, работающих с СВЧ-излучением?
43. Как Вы думаете, почему в медицинских учреждениях используют УВЧ-процедуры в лечебных целях, а на рабочих местах проводится комплекс мероприятий, направленных на защиту работающего персонала?
44. Что можно считать зонами электромагнитного комфорта и дискомфорта?
45. На кого будет более эффективно действовать излучение – на больного человека (с повышенной влажностью кожи) или на здорового (с нормальной влажностью кожи)? Объясните, почему это так происходит?
46. Представляют ли опасность исследования, направленные на поиск путей управления психикой и поведением человека за счёт использования внешних источников радиоизлучения?
47. Подумайте, может ли человек излучать радиоволны? Если да, то перечислите, в каких диапазонах частот.
48. Может ли человек выполнять функцию приёмной антенны, не подозревая об этом?
49. Может ли приёмная антенна, например, радиотелескопа, облучать население вблизи своего места размещения?
50. Почему во время извержения вулканов начинают светиться лампы дневного света?
51. Устройство и принцип действия сотовой связи.
52. Влияние сотовой связи на здоровье человека.
53. Дайте определение предельно допустимого уровня.
54. Почему пассажирам нельзя пользоваться радиоэлектронной аппаратурой при взлёте и посадке самолёта.
55. В чём заключается действие мощных радиоимпульсов на окружающую среду?
56. Какой смысл имеет понятие «оружие нелетального воздействия»?
57. Дайте определение удельной поглощённой мощности.
58. Единицы измерения удельной поглощённой мощности.
59. Влияние кровеносных сосудов на нагрев тканей человека.

60. К чему приводит наличие металлических предметов, расположенных внутри или снаружи тела человека, при поглощении радиоволн.
61. В чём заключается нетепловое действие радиоволн?

ЗАДАНИЯ И УПРАЖНЕНИЯ

1. Рассчитайте длины волн для следующих частот: 3 ГГц, 10 ГГц, 37,5 ГГц и 30 МГц.
2. Волновое сопротивление свободного пространства определяется из соотношения $\rho_o = \sqrt{\mu_o / \varepsilon_o}$. Рассчитайте, чему равна эта величина, и подумайте, зависит ли она от длины волны.
3. Чему равна плотность потока мощности, усреднённая за период колебаний на расстоянии 1 км от телепередатчика, получающего мощность, равную 5 кВт?
4. Определите объёмную плотность энергии, заключённой в электрическом поле электромагнитной волны (W_E), если его напряжённость составляет 10 мВ/м.
5. Рассчитайте объёмную плотность энергии магнитной составляющей (W_H) волны, если величина напряжённости магнитного поля равна 10 А/м.
6. Назовите несколько длин волн, на которых возможно усиление электромагнитных колебаний в помещении длиной 8 м, шириной 6 м и высотой 4 м.
7. Связь между средней и импульсной мощностью источника радиоволн может быть представлена в виде известного соотношения:
$$P_{ср} = P_{имп}\tau F.$$
Рассчитайте среднее значение мощности $P_{ср}$, если $P_{имп} = 30$ кВт, длительность радиоимпульса $\tau = 10$ мс, а частота повторения импульсов 5 Гц.
8. Произведите грубую оценку глубины проникновения электромагнитного поля в мышечную ткань на частотах 100 МГц и 1 ГГц.
9. Рассчитайте величину скин-слоя для меди на частоте 3 ГГц.
10. Запишите условие выбора ячеек экранирующей сетки в зависимости от длины волны источника излучения.
11. Рассчитайте напряжённость электрического поля электромагнитной волны на расстоянии 1,5 и 10 км от передатчика, если мощность излучения составляет 1 и 5 кВт, а высота передающей и приёмной антенн равна 50 м.
12. Разложите в ряд Фурье импульс длительностью 1 мкс.

13. Рассчитайте величину санитарно-защитной зоны, когда мощность базовой станции сотовой связи составляет 10 Вт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голдсмит Д., Оуэн Т. Поиски жизни во Вселенной. – М.: Мир, 1983. – 488 с.
2. СВЧ-энергетика. Т.3. Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике / Под ред. Э. Окресса. – М.: Мир, 1971. – 248 с.
3. Гвоздарев А.Ю. Об электромагнитных полях в космобиологии // Современные проблемы естествознания. – М.:–1997. – Вып. 1. – С.34–55.
4. Протасевич Е.Т. Электромагнитное загрязнение окружающей среды: Учебное пособие. – Томск: Изд. Томского политехнического университета, 1995. – 52 с.
5. Bernhardt J. Медицинские аспекты мобильной связи (перевод с немецкого) // Бытовая радиоэлектроника. – 2001. – № 6. – С.21–23.
6. Протасевич Е.Т. Естественный и техногенный электромагнитный фон и его воздействие на окружающую среду // Биофизика.– 1992.–Т.37.– Вып.4. – С. 825–831.
7. Экология и безопасность: Справочник. – Том 1–3. – М.: ВНИИПИ, 1989.
8. Экологические аспекты экспертизы изобретений: Справочник. – Том 1–2. – М.: ВНИИПИ, 1989.
9. Малышев В.М., Колесник Ф.А. Электромагнитные волны сверхвысокой частоты и их воздействие на человека. – Л.: Медицина, 1968. – 88 с.
10. Дмитриев А.Н., Похолков Ю.П., Протасевич Е.Т., Скавинский В.П. Плазмообразование в энергоактивных зонах. – Новосибирск: Изд-во Объед. ин-та геологии, геофизики и минералогии СО РАН, 1992.
11. Дмитриев А.Н. Геологические аспекты аномальных явлений и глобальная экология // Изв. вузов. Физика. – 1992. – №3. – С. 30–38.
12. Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Чистякова Л.К., Шишковский В.И. Воздействие лазерного и ВЧ-излучений на воздушную среду. – Новосибирск: Наука, 1992. – 190 с.
13. Протасевич Е.Т., Хан В.А. Распространение пучков электромагнитных волн через атмосферу. – Томск: Изд-во ТГУ, 1994. – 209 с.

14. Протасевич Е.Т. Светящиеся плазменные образования в атмосфере и их воспроизведение в лабораторных условиях // Изв. вузов. Физика. – 1992. – №3. – С. 87–104.
15. Дмитриев А.Н. Корректирующая роль гелиоцентрированных необычных атмосферных явлений // Изв. вузов. Физика. – 1992. – №3. – С. 105–110.
16. Воробьёв Л.П., Шестаков В.А., Андреев Н.Г. Миллиметровые волны в медицинской диагностике // Зарубежная радиоэлектроника. – 1984. – № 11. – С. 107–112.
17. Гуляев Ю.В., Годик Э.Э. Физические поля биологических объектов // Химия и жизнь. – 1984. – № 1. – С. 78–82.
18. Бояркина А.П., Байковский В.В., Васильев Н.В. и др. Аэрозоли в природных планшетах Сибири. – Томск: Изд-во ТГУ, 1993. – 157 с.
19. Педак А.М., Баклашов П.И., Барвинский Л.Л. и др.: Справочник по основам радиолокационной техники. – М.: Воениздат, 1967. – 768 с.
20. Вержиковский А.П., Габис Н.В., Китаев Н.М.: Краткий словарь по радиоэлектронике. – М.: Воениздат, 1964. – 256 с.
21. Крылов В.А., Юченкова Г.В. Защита от электромагнитных излучений. – М.: Сов. Радио, 1972. – 320 с.
22. Марков Г.Т., Петров Б.М., Грудинская Г.П. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Сов. Радио, 1969. – 367 с.
23. Чернушенко А.М., Меланченко Н.Е., Малорацкий Л.Г., Петров Б.В. Конструкция СВЧ-устройств и экранов. – М.: Радио и связь, 1983. – 440 с.
24. Никольский В.В., Никольский Т.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1989. – 544 с.
25. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.
26. Электромагнитное загрязнение окружающей среды // Международная конф. Тез. докл. – Санкт-Петербург, 1993. – 208 с.
27. Электромагнитный терроризм на рубеже тысячелетий / Под ред. Т.Р. Газизова. – Томск: Изд-во ТГУ, 2002. – 206 с.
28. Протасевич Е.Т. Электромагнитное оружие. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2004. – 100 с.

СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Протасевич Е.Т. О перспективах комбинированного применения лазерного и СВЧ-излучений для эффективного воздействия на

металлическую мишень // Журнал технической физики. – 2004. – Т. 74. – вып. 3. – С. 138–139.
2. Protasevich E.T., Shishkovsky V.I. Effect of intensive laser and RF-radiation on metallic target // 2004 – IEEE Power modulator conference, San Francisco, USA, 2004. – 143 p.
3. Веденеев А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 208 с.
4. Копытин Ю.Д., Протасевич Е.Т., Чистякова Л.К., Шишковский В.И. Воздействие лазерного и ВЧ-излучений на воздушную среду. – Новосибирск: Наука, 1992 – 190 с.
5. Swegle J.A., Benford J.N. High-power Microwaves at 25 Years: The Gurrent State of Development // Beanes` 98: Proc. 12 th Intern. Conf. On High-Power Particle Beanes, Haifa, Israel. – 1998.–Vol.l. – P. 149–152.
6. Протасевич Е.Т., Хан В.А. Распространение пучков электромагнитных волн через атмосферу. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1994. – 209 с.
7. Капица П.Л. О природе шаровой молнии // Докл. АН СССР. – 1955. – Т. 101 – №2. – С. 245–247.
8. Protasevich E.T. Cold non-equilibrium plasma. Generation. Properties. Applications. – Cambridge: Cambridge Intern/ Science Publishing, 199. – 204 p.
9. Игнатьев Г.Ф., Протасевич Е.Т. Моделирование устойчивых плазменных образований во влажном воздухе в природных условиях // Теплофизика выс. температур. – 2000. – Т.38. – №1. – С. 150–152.
10. Abrams M. Dawn of The E-Bomb // IEEE SPECTRUM. – 2003. – No. 11 (November). – P. 24 – 30.
11. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. – М.: Атомиздат, 1977. – 280 с.
12. Микроволновой по Саддаму // Дело техники, 12 февраля – 2003.
13. Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д. и др. Сильноточные импульсно-периодические ускорители электронов для генераторов СВЧ-излучения // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы повышения мощности и частоты излучения. – Горький: Изд-во института прикладной физики АН СССР, 1981. – С. 5–21.
14. Диденко А.Н., Фурман Э.Г., Васильев В.В., Канаев Г.Г. Линейные индукционные ускорители для высокочастотной электроники // Релятивистская высокочастотная электроника. Проблемы

повышения мощности и частоты излучения. – Горький: Изд-во ИПФ АН СССР, 1981. – С. 22–35.
15. Винтизенко И.И., Фурман Э.Г. Линейные индукционные ускорители // Изв. вузов. Физика. – 1998. – № 4. – С. 111–119.
16. Григорьев В.П., Коваль Т.В. Теория генерации электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Изв. вузов. Физика. – 1998. – №4. – С. 169–182.
17. Фоменко Г.П., Сулакшин А.С., Филиппенко Н.М. и др. Исследование релятивистских СВЧ-генераторов О-и М-типа // Изв. вузов. Физика. 1998. – №4. – С. 146–156.
18. Юшков Ю.Г., Артёменко С.Н., Новиков С.А. Компрессия СВЧ-импульсов // Изв. вузов. Физика. – 1998. – №4. – С. 157–169.
19. Диденко А.Н., Протасевич Е.Т., Штейн Ю.Г. и др. Исследование резонаторов бегущей волны на высоком уровне мощности // Докл. VII Всесоюзн. научн. конф. по электронным приборам СВЧ и области их применения. – Томск: Изд-во Том. гос. ун-та, 1972.– Вып. 4. – С. 63–68.
20. Протасевич Е.Т., Штейн Ю.Г. Резонатор бегущей волны с высоким коэффициентом усиления // Изв. Томск. политехн. ин-та, 1975. – Т. 232. – С. 2–7.
21. Протасевич Е.Т. Экспериментальные исследования взаимодействия электронов с незамедленной волной H_{10} прямоугольного волновода в нарастающем магнитном поле // Журн. техн. физики. – 1995. – Т. 65. – № 6. – С. 133–140.
22. Протасевич Е.Т. Авторезонансный СВЧ-ускоритель электронов // Приборы и техн. эксперимента. – 1994. – № 1. – С. 137–143.
23. Протасевич Е.Т. Электромагнитные волны /Статьи, выступления. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 1998. – 90 с.
24. Малышев В.М., Колесник Ф.А. Электромагнитные волны сверхвысокой частоты и их воздействие на человека. – Л.: Медицина, 1968. – 88 с.
25. Протасевич Е.Т. Электромагнитное загрязнение окружающей среды. – Томск: Изд. ТПУ, 1995. – 52 с.
26. Bernhardt J. Медицинские аспекты мобильной связи (перевод с немецкого) // Бытовая радиоэлектроника. – 2001. – № 6. – С. 21–23.
27. Протасевич Е.Т. Влияние радиоизлучения телецентра на смертность населения в городе Томске // Радиолокация, навигация, связь. – 2003. – Т. 2. – С. 1329–1332.

28. Protasevich E.T., Grigoryev V.B. Electromagnetic Emission and Plasma in Ecology. – Cambridge: Cambridge Intern Science Publishing, 2004. – 220 p.
29. Schamiloglu E., Barker R.J. Recent Achievements in the University High Power Microwave Research Program in the United States || 12 th Symp. On High Curret Electronics, Tomsk, 2000. – Vol. 2. – P. 393–398.
30. Rostov V.V., Gunin A.V., Korovin S.D. et. Al. Repetitively-Pulsed Operation of the Recativistic BWO // 12 th Symp. On High Curret Electronics, Tomsk, 2000. – Vol. 2. – P. 408–411.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПОСОБИИ И В РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

ЭП, Э – электрическое поле
ЭМ, ЭМП – электромагнитное поле
E – напряжённость электрического поля
H – напряжённость магнитного поля
B – индукция магнитного поля
f, ν – частота
T – период, время воздействия
P – мощность
ε – энергия
ППМ – плотность потока мощности
ППЭ – плотность потока энергии
ДУ – допустимый уровень
ПДУ – предельно допустимый уровень
ПДЗ – предельно допустимые значения
ВЧ – высокие частоты
СВЧ – сверхвысокие частоты
УПМ – удельно-поглощаемая мощность
SAR – specific absorption rate – то же, что и УПМ в англоязычной литературе
ОНЛВ – оружие нелетального воздействия
$\omega=2\pi f$ – частота
ЭМИ – электромагнитные излучения

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ, УПОТРЕБЛЯЕМЫХ ПРИ РАССМОТРЕНИИ МЕХАНИЗМА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Приведём сводку основных характеристик электромагнитных полей, которые используются при рассмотрении «загрязнения» окружающей среды и выборе санитарно-гигиенических нормативов воздействия электромагнитных излучений на человека:

1.Интенсивность облучения:

а) напряжённость электрического поля, В/м (или В/см);

б) напряжённость магнитного поля, А/м (или Э, Гс);

в) плотность потока мощности (энергии), Вт/см^2 (мВт/см^2 или мкВт/см^2).

2. Временные характеристики переменных полей:

а) частота, Гц (кГц, ГГц);

б) скважность следования и форма радиоимпульсов;

в) длительность радиоимпульсов.

3. Временные характеристики воздействия переменными электромагнитными полями:

а) длительность воздействия, ч (с, мин);

б) кратность воздействия с описанием всех временных интервалов.

4. Условия воздействия электромагнитных полей:

а) на рабочих местах (в условиях труда);

б) внутри жилых зданий (для населения);

в) на территории зоны жилой застройки;

г) в населённой местности, вне зоны жилой застройки, а также на территории садов и огородов;

д) в ненаселённой местности;

е) в труднодоступной местности и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения.

Приложение 1

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОЩНЫХ РАДИОИМПУЛЬСОВ

На основе общедоступной информации в данном приложении описано устройство микроволнового оружия, принцип его работы и способы практического использования. Автор сознательно избегает использовать сложный математический аппарат, что делает доступным понимание материала любому читателю, знакомому лишь с основами физики в пределах школьной программы.

1.1. Возможности и ожидаемые результаты воздействия электромагнитного оружия

Исторически впервые использовать мощные потоки электромагнитного излучения предлагалось для поражения воздушных целей (американский проект «Марк-2» в 70-е годы XX века). После чего усилились работы по созданию мощных источников радиоволн. Необходимо отметить, что приземная атмосфера в целом прозрачна для радиоволн. Максимумы поглощения для паров воды приходятся на длины волн 1,35 см, 1,5 и 0,7 мм и для кислорода – 0,5 и 0,25 см. По этой причине основное внимание для решения этой задачи было уделено двух- и трёхсантиметровому диапазонам длин волн. Успехи, достигнутые релятивистской СВЧ-электроники дали новый импульс в проведении таких исследований.

Согласно концепции разработчиков такого оружия мощные радиоволны способны индуцировать большие токи на поверхности летательного аппарата (самолёта, вертолёта, ракеты), достаточные для плавления его обшивки и нарушения герметичности аппарата.

Из открытых источников (а к закрытым автор не имел никогда никакого отношения) неизвестно, были ли натурные эксперименты по использованию мощных потоков радиоволн для уничтожения мишеней летательных аппаратов. Скорее всего, нет, а если и были, то результаты испытаний особо не рекламировались.

В середине 80-х годов конкуренцию релятивистским СВЧ-генераторам большой мощности стали составлять лазеры, на использование которых ориентировались американцы при разработке своей системы ПРО. В 90-е годы в духе голливудских боевиков на телеэкранах всего мира демонстрировалась американская кинохроника о том, как эта

чудо-техника сбивает мишени, правда, с небольшой оговоркой, что эффективность применения лазеров оказалась невысокой.

В [1,2] для усиления взаимодействия лазерного излучения с мишенью предлагается использовать СВЧ-излучение сантиметрового диапазона длин волн. Остановимся на этом вопросе подробнее.

Известно [3], что лазерное излучение большой мощности способно создавать на малом участке поверхности мишени высокие плотности теплового потока, достаточные для нагрева, плавления или испарения практически любого материала. Протекание перечисленных процессов обусловлено термическим эффектом поглощения излучения твёрдыми телами. Однако, если мишень выполнена из металла, то её поверхность хорошо отражает излучение оптического диапазона длин волн. В частности, для вольфрама коэффициент отражения излучения CO_2-лазера равен приблизительно 0,9, т.е. в этом случае коэффициент поглощения излучения холодной мишенью не превышает 10 % [3].

Когда интенсивность излучения составляет ~ 10^{10} Вт/см^2 над поверхностью мишени наблюдается оптической пробой воздуха и образуется плазма с температурой в десятки тысяч Кельвинов [4]. В зависимости от условий эксперимента формирование плазмы вблизи мишени может сильно изменить характер её взаимодействия с мишенью: ослабить или усилить это взаимодействие.

Усиление взаимодействия для коротких импульсов (τ ~ 1 мкс) наблюдается, когда за время действия импульса плазма не успевает отойти от мишени. В этом случае передача энергии возрастёт за счёт теплопроводности или за счёт излучения плазмой коротковолнового излучения в видимом или ультрафиолетовом диапазонах, которое поглощается мишенью более эффективно, чем первичное длинноволновое излучение CO_2-лазера.

Значение эффективного коэффициента поглощения излучения мишенью α максимально при достижении порога плазмообразования. При дальнейшем росте интенсивности излучения α быстро падает из-за роста скорости волны распространения плазмы, вследствие чего плазменное образование за время действия импульса успевает отойти от мишени. Противоречие, заключающееся в том, что для инициирования пробоя требуется высокая интенсивность оптического излучения, а для эффективного энерговклада в плазму, наоборот, низкая, традиционно на практике устраняется выбором формы импульса лазерного излучения. Для этого формируется импульс, состоящий из узкого пика длительностью ~ 200 нс (для поджига разряда) и длинного хвоста, в котором сосредоточена основная энергия импульса (предназначенная для энерговклада в плазму).

При комбинированном воздействии лазерное излучение обеспечивает пробой воздуха над поверхностью мишени, а эффективный энерговклад в образовавшуюся плазму происходит за счёт СВЧ-излучения. Рассмотрим эти процессы подробнее.

При отражении СВЧ-излучения от проводящей поверхности мишени образуется стоячая волна. Согласно граничным условиям, тангенсиальная составляющая электрического поля падающей волны на поверхности проводника равна нулю. Тогда первый максимум стоячей волны поля будет находиться приблизительно на расстоянии $l = \lambda/4$ от поверхности мишени (здесь λ – длина волн СВЧ-излучения). Очевидно, что для получения максимального энерговклада в плазму необходимо, чтобы $l \to 0$. На практике это означает, что оптимальным с точки зрения энерговклада является трёхсантиметровый диапазон длин волн, поскольку при переходе к более коротким миллиметровым волнам резко падает уровень мощности генерирующего излучения [5]. При $\lambda = 3$ см получаем $l \sim 0{,}75$ см.

Наши измерения показывают [6], что при относительной влажности воздуха, равной ~ 70 % и температуре T = 292,5 К, в зависимости от времени, прошедшего с момента начала пробоя, скорость перемещения фронта расширяющегося плазменного образования, полученного с помощью CO_2-лазера ($\lambda = 10{,}6$ мкм, $I = 10^8 \ldots 10^{10}$ Вт/см^2 и $\tau_{фр} = 100$ нс), линейно падает на начальном участке, а затем через 3,5 мкс зависимость изменения скорости испытывает резкий перегиб и её значения становятся меньше или сравнимы со скоростью звука. Среднее значение скорости на падающем участке кривой $V = f(t)$ составляет приблизительно $3 \cdot 10^3$ м/с. Тогда, если принять за 3,5 мкс время отхода лазерной плазмы от мишени, то нетрудно получить, что за это время плазма окажется на расстоянии ~ 1 см от поверхности мишени, т.е. на расстоянии приблизительно равном $\lambda/4$ СВЧ-излучения, энергия которого обеспечивает необходимый энерговклад в плазму, поскольку сгусток окажется в первом от мишени максимуме электрического поля стоячей волны, как это показано на рис. 1.

Для обеспечения максимального энерговклада в плазму необходимо выполнение следующего условия:

$$\lambda = 3{,}65d, \qquad (1)$$

d – диаметр плазменного образования.

Для нашего случая выполнение условия (1) означает, что $d \sim 0{,}8$ см, т. е. радиус плазмы $d/2$ получается меньше, чем расстояние до мишени 1. Резонансный характер процесса поглощения СВЧ-энергии приводит к тому, что размер лазерной плазмы застабилизируется, вследствие чего возрастёт эффективность её воздействия на мишень при поглощении

СВЧ-энергии. Поскольку $\lambda>1$, то структура поля стоячей волны сохранится без заметного искажения в течение всего времени действия СВЧ-импульса. Модельные эксперименты, выполненные в поле стоячей волны с пробным телом, размеры которого близки к диаметру плазмы, также показали, что структура поля практически не искажается.

Однако, вернёмся ещё раз к последствиям непосредственного использования электромагнитного оружия.

Эффективность поражения определяется плотностью потока СВЧ-мощности на поверхности или у поверхности летательного аппарата, подлежащего уничтожению. При большой плотности возможны следующие явления.

Во-первых, протекание мощных поверхностных токов на поверхности объекта. В случае фокусировки излучения и расплавления металла возможно нарушение герметичности объекта, подлежащего уничтожению (о чём уже говорилось ранее).

Во-вторых, плазменное образование у поверхности летательного аппарата может поглощать энергию, получаемую извне, и тем самым будет нагревать окружающий воздух. А поскольку нагретый газ расширяется, то вокруг плазмоида образуется зона нагретого воздуха с пониженной плотностью. Эксперименты показывают, что местонахождение плазменного образования в атмосфере можно фиксировать в точке пересечения двух лучей мощных радиолокаторов. При смещении в пространстве такой точки пересечения лучей смещается и сам плазмоид. В результате такого перемещения плазменного образования образуется кильватерный след нагретого воздуха пониженной плотности. Перепад плотности воздуха на границе кильватерного следа окажется непреодолимым препятствием для любого летательного аппарата, попавшего на эту границу. В частности, для самолёта или крылатой ракеты появление плазмоида перед одним из крыльев и формирование разряжения воздуха означает резкое изменение подъёмной силы на этом крыле, что приводит к появлению вращающего момента у летательного аппарата. В результате такого мгновенного раскручивания (за доли секунды) разрушается летательный аппарат.

Подобная схема применения плазменного образования, предложенная Р.Ф. Авраменко для использования в противоракетной обороне (без приведённой здесь детализации), обсуждалась в средствах массовой информации ещё в 1993 году, когда президент РФ, Е.Н. Ельцин, выступил с инициативой проведения совместно с США крупномасштабного эксперимента по созданию управляемых с Земли плазмоидов и размещения их на пути атакующих ракет, во время его встречи с Б. Клинтоном. Насколько известно, такая инициатива не получила поддержки,

хотя широко обсуждалась в открытой печати. Причин для этого было несколько: несговорчивость американцев и нежелание их обеспечить финансирование работ; преждевременная смерть Р.Ф.Авраменко; болезнь и уход с политической арены Б.И. Ельцина.

Необходимо отметить, что помощники Б.Н. Ельцина, обеспечивающие «проталкивание» предложения в США и даже входившие в состав его делегации, не обращали внимания на одно важное обстоятельство, которое может воспрепятствовать эффективному использованию плазменного образования (плазмоида). Таким препятствием являются метеоусловия, поскольку температура плазмы, а следовательно, и плотность воздуха в кильватерном следе, возникшем на пути перемещения плазмоида, сильно зависят от влажности воздуха. В частности, существует значение относительной влажности (приблизительно 95–98 %), когда вместо горячей плазмы формируется холодная неравновесная плазма, у которой температура нейтральных частиц близка к комнатной [8]. В этом случае ни о каком нагреве воздуха уже не может быть и речи, и кильватерный след станет «незаметным» для летательного аппарата.

В-третьих, в конце Второй мировой войны усилиями немецких физиков был установлен интересный факт локализованного выделения энергии из пламени углеводородов, приведённого во вращение, при его соприкосновении с поверхностью металла. При определённых природных условиях получить вращающуюся плазму, т. е. пламя, возникающее при горении продуктов разложения воды, можно в предгрозовой период времени, когда напряжённость электрического поля повышается со 130 В/м (при нормальных метеоусловиях) до 10 кВ/м (в предгрозовой период). Вращение плазмы происходит за счёт наличия в пространстве скрещенных электрического и магнитного полей. Эксперименты показывают [9], что в данном случае скорость вращения плазмы в природных условиях может достигать до 10 кГц. Получить ионизацию воздуха СВЧ-волнами в природных условиях легко, однако хуже обстоит дело с магнитными полями. Видимо, перспективнее создавать вращающуюся плазму не у самого объекта, а в специальной магнитной ловушке и затем стрелять сгустком такой плазмы в объект за счёт быстрого изменения конфигурации магнитного поля. Из литературы известны такие схемы.

В-четвёртых, грозовое облако содержит огромный электрический заряд, и если создать между этим облаком и объектом проводящий канал, то это облако разрядится в летательный аппарат, что приведёт к его разрушению. Создать такой проводящий канал можно за счёт ионизации воздуха СВЧ-излучением. В техническом отношении это сложная задача. Однако её реализация вполне осуществима.

Кроме прямого воздействия микроволнового оружия на летательные аппараты возможно и его косвенное использование для выведения из строя компьютеров и других систем управления. Анализ зарубежных источников показывает, что это направление работ по созданию микроволнового оружия (или по американской терминологии э-бомбы) считается наиболее перспективным. Согласно утверждениям зарубежных специалистов, Пентагон ставит своей целью создание такого электромагнитного оружия, которое бы разрушило средства связи противника, парализовало бы управление его войсками и блокировало бы использование военных и других важнейших объектов в случае возникновения военных конфликтов. По мнению зарубежных специалистов, эта область применение микроволнового оружия считается основной. Его действие распространяется со скоростью света, не сопровождается какими-то визуальными эффектами и не подвержено действию гравитации.

Приложение 2

Таблица 26

Предельно допустимые величины электромагнитной энергии на территории жилой застройки

Наименование диапазонов радиоволн	Граница диапазона	Предельно допустимые величины электромагнитной энергии на территории жилой застройки
1	2	3
Длинные	30–300 Гц (10–1 км)	10 Вт/м^2
Средние	0,3–3,0 МГц (1–0,1 км)	10 Вт/м^2
Короткие	3–30 МГц	4 Вт/м^2
УКВ	30–300 МГц (10–1 м)	2 Вт/м^2
СВЧ (круглосуточное облучение)	0,3–300 ГГц (1 м–1 мм)	5 мкВт/см^2

Таблица 27

Ткани с высоким содержанием воды			Ткани с низким содержанием воды		
Частота Гц	Относит. диэлектрич. проницаемость $\varepsilon_г$	Удел. проводимость γ, 1/Ом·м	Частота Гц	Относит. диэлектрич. проницаемость, $\varepsilon_г$	Удел. проводимость, γ, 1/Ом·м
10	10^7	0,104	В цитируемой литературе не приводятся		
10^2	$8\cdot10^5$	0,112			
10^3	$1{,}3\cdot10^5$	0,125			
10^4	$6\cdot10^4$	0,131			
10^5	$2\cdot10^4$	0,192			
10^6	$2\cdot10^4$	0,40	$2{,}7\cdot10^7$	20	$(10{,}9\ldots43{,}2)\cdot10^{-3}$
10^7	160	0,625	$4\cdot10^7$	14,6	$(12{,}6\ldots52{,}8)\cdot10^{-3}$
10^8	71,7	0,890	10^8	7,45	$(19{,}1\ldots75{,}9)\cdot10^{-3}$
10^9	50	1,63	$1{,}5\cdot10^9$	5,6	$(70{,}8\ldots171)\cdot10^{-3}$
10^{10}	40	10,3	10^{10}	4,5	$(324\ldots549)\cdot10^{-3}$

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ 3
2. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА КАК ИСТОЧНИКА ОПАСНОСТИ ДЛЯ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ 8
2.1. Природный электромагнитный фон 8
2.2. Техногенный электромагнитный фон 12
2.3. Экологичность сотовой связи 23
2.4. Помещение, как объёмный резонатор, реагирующий на внешние и внутренние электромагнитные поля 31
3. НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН 35
4. ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ 37
5. БИОЛОГИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН 39
6. МИКРОВОЛНОВОЕ ОРУЖИЕ НЕЛЕТАЛЬНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ 40
6.1. Состояние исследований в области оружия нелетального воздействия радиоволн на человека 41
6.2. Общие вопросы воздействия радиоволн на человека 44
6.3. Нетепловое действие электромагнитных волн. Предварительная оценка состояния работ в области разработки оружия нелетального воздействия 48
7. ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ВЧ- И СВЧ-ДИАПАЗОНОВ ВНУТРИ ЗДАНИЙ 50
8. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ВЫРАЖЕНИЯ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ АКТИВНОСТЬ РАДИОВОЛН 59
9. ЗАТУХАНИЕ И ОТРАЖЕНИЕ РАДИОВОЛН В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ 62
10. ЗАЩИТА И ПРОФИЛАКТИКА ПОРАЖЕНИЙ РАДИОВОЛНАМИ 64
10.1. Дополнительная информация о биологическом действии электромагнитных полей 66
10.2. Нормирование электромагнитных полей 67
10.3. Защита персонала от радиоволнового облучения 72
10.4. Мероприятия защиты населения от ЭМИ 74
10.5. Допустимые значения параметров неионизирующих электро-

магнитных излучений для ПЭВМ 78
10.6. Профилактика поражения радиоволнами 79
11. ЗАКЛЮЧЕНИЕ 80
12. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ 81
13. ЗАДАНИЯ И УПРАЖНЕНИЯ 85
14. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 86
15. СПИСОК ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 87
16. СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПОСОБИИ И В РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЕ 91
17. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЙ, УПОТРЕБЛЯЕМЫХ ПРИ РАССМОТРЕНИИ МЕХАНИЗМА ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ЧЕЛОВЕКА И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ 92
18. ПРИЛОЖЕНИЕ 1 93
19. ПРИЛОЖЕНИЕ 2 98

Евгений Трофимович Протасевич

Электромагнитный фон и его влияние на человека

Учебное пособие
Научный редактор
доктор технических наук, профессор В.Ф. Панин

Редактор О. Н. Свинцова

Подписано к печати 2004.
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. печ. л. 5,87. Уч.-изд. л. 5.32.
Тираж 100 экз. Заказ . Цена свободная.
Изд-во ТПУ. 634050, Томск, пр. Ленина, 30.