

**РУКОВОДСТВА МКЗНИ ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПЕРЕМЕННЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
(ДО 300 ГГц)**

Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения*†

ВВЕДЕНИЕ

В 1974 году в рамках Международной ассоциации по радиационной защите (IRPA) была сформирована рабочая группа по неионизирующему излучению (НИИ), задачей которой являлось рассмотрение вопросов, связанных с защитой от различных типов НИИ. На конгрессе IRPA в Париже в 1977 году эта рабочая группа была преобразована в Международный комитет по неионизирующему излучению (INIRC).

В содействии с отделом по защите окружающей среды Всемирной Организации Здравоохранения (WHO, ВОЗ) в рамках программы по разработке критериев защиты здоровья человека от воздействия различных факторов окружающей среды, финансируемой по программе ООН по окружающей среде (UNEP), международным комитетом IRPA/INIRC были подготовлены критерии защиты здоровья человека от НИИ. Каждый документ включает обзор физических характеристик, приборов и методов измерений, источников НИИ и их применения, тщательный анализ литературных данных о биологических эффектах и оценку риска для здоровья человека в результате воздействия НИИ. Эти документы послужили научной основой для последующей разработки ограничений воздействия НИИ и рекомендаций по обращению с НИИ на практике.

На восьмом международном конгрессе IRPA (Монреаль, 18-22 мая, 1992 г.) была учреждена новая независимая научная организация, Международная комиссия по защите от неионизирующего излучения (ICNIRP, МКЗНИ), являющаяся преемником IRPA/INIRC. Задачами МКЗНИ являются исследование рисков для здоровья человека, которые могут быть связаны с воздействием различных типов НИИ, разработка международных руководств по ограничению воздействия НИИ и рассмотрение всех других вопросов, связанных с защитой от НИИ.

Обзор биологических эффектов воздействия постоянных и переменных (ниже 300 Гц) электрических и магнитных полей был опубликован в документах UNEP/WHO/IRPA (1982, 1987). Эти публикации и многие другие, включая UNEP/WHO/IRPA (1993) и Allen et al. (1991), являются научной основой для разработки настоящих руководств.

Словарь терминов приводится в Приложении.

* Секретариат МКЗНИ: ICNIRP Secretariat, c/o Dipl.-Ing. Rudiger Matthes, Bundesamt fur Strahlenschutz, Institut fur Strahlenhygiene, Ingolstadter Landstrasse 1, D-85764 Oberschleissheim, Germany.

† В период подготовки этого документа состав МКЗНИ был следующим (приведены на англ. яз.): A. Ahlbom (Швеция); U. Bergqvist (Швеция); J.H. Bernhardt, председатель МКЗНИ с мая 1996 года (Германия); J.P. Cesarini (Франция); L.A. Court, в МКЗНИ до мая 1996 года (Франция); M. Grandolfo, вице-председатель до апреля 1996 года (Италия); M. Nietanen, в составе МКЗНИ с мая 1996 года (Финляндия); A.F. McKinlay, вице-председатель МКЗНИ с мая 1996 года (Соединенное Королевство Великобритании и Северной Ирландии); M.H. Repacholi, председатель МКЗНИ до апреля 1996 года, заслуженный председатель в отставке с мая 1996 года (Австралия); D.H. Sliney (США); J.A.J. Stolwijk (США); M.L. Swicord, в составе МКЗНИ до мая 1996 года (США); L.D. Szabo (Венгрия); M. Taki (Япония); T.S. Tenforde (США); H.P. Jammet (заслуженный член МКЗНИ, ум.) (Франция); R. Matthes, научный секретарь МКЗНИ (Германия).

В подготовке этого документа приняли участие внешние эксперты: S. Allen (Соединенное Королевство); J. Vrix (Германия); S. Eggert (Германия); H. Garm (Австрия); K. Jokela (Финляндия); H. Korniewicz (Польша); G.F. Mariutti (Италия); R. Saunders (Соединенное Королевство); S. Tofani (Италия); P. Vecchia (Италия); E. Vogel (Германия). Авторы документа приносят благодарность и другим международным экспертам за ценные комментарии.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Основной целью настоящего документа является разработка научно обоснованных руководств по ограничению воздействия электромагнитных полей (ЭМП) на человека для обеспечения приемлемого уровня защиты здоровья человека от известных неблагоприятных эффектов. Неблагоприятные медицинские эффекты вызывают обнаруживаемое ухудшение состояния здоровья человека, находящегося под воздействием ЭМП, или здоровья его потомков. Биологические эффекты могут как привести, так и не привести к возникновению неблагоприятных эффектов для здоровья.

В руководствах рассматриваются эффекты прямого и косвенного воздействия ЭМП, т.е. эффекты при непосредственном взаимодействии полей с телом человека и при контакте человека с объектом, обладающим другим электрическим потенциалом, соответственно. Обсуждаются результаты лабораторных и эпидемиологических исследований, основные ограничения воздействия и контролируемые уровни для практической оценки риска. Настоящие руководства используются для разработки нормативов по ограничению воздействия в производственных условиях и на население.

Руководства для высокочастотных ЭМП и полей с частотой 50/60 Гц, изданные IRPA/INIRC в 1988 и 1990 годах соответственно, заменяются настоящими руководствами, которые охватывают весь диапазон переменных ЭМП (до 300 ГГц). Руководство по ограничению воздействия постоянных магнитных полей было опубликовано МКЗНИ в 1994 году (ICNIRP 1994).

МКЗНИ признает, что для оценивания и установления пределов воздействия ЭМП на человека необходимо согласовать мнения различных экспертов, проанализировать обоснованность результатов и выводов научных исследований и провести экстраполяцию результатов исследований, полученных на лабораторных животных, к эффектам для человека. Основой для ограничения воздействия ЭМП на человека являются только научные данные. Очевидно, что на современном уровне научных знаний соблюдение ограничений гарантирует адекватный уровень защиты человека от воздействия переменных ЭМП.

В настоящих руководствах вводятся два уровня ограничений:

- **Основные ограничения:** Ограничения воздействия переменных электрических, магнитных и электромагнитных полей, которые напрямую оцениваются на основании научно доказанных эффектов для здоровья человека, называются «основными ограничениями». Основные ограничения вводят для тех физических величин, которые непосредственно связаны с наблюдаемыми эффектами. Т.к. механизмы взаимодействия ЭМП с биообъектами различны в зависимости от частоты поля, основные ограничения устанавливаются для различных физических величин: плотность индукционного тока (J), удельная поглощенная мощность (SAR)* и плотность потока энергии (S). Однако их количественная оценка является сложной в условиях воздействия ЭМП на человека. Единственным параметром, который может быть легко измерен вне тела человека, является плотность потока энергии в воздухе. Поэтому для практической оценки воздействия, например, при проведении санитарно-гигиенического контроля, введены контролируемые уровни.

- **Контролируемые уровни:** Эти ограничения были введены для практической оценки воздействия и позволяют определить его соответствие основным ограничениям. Контролируемые уровни были получены из соответствующих основных ограничений с использованием расчетных или инструментальных методов, либо были получены с учетом чувствительности человека к воздействию (например, к току прикосновения) и неблагоприятных эффектов косвенного воздействия ЭМП. Для контролируемых уровней

* Для SAR (specific energy absorption rate) используется терминология, принятая Российским национальным комитетом по защите от неионизирующих излучений

были получены следующие физические величины: напряженность электрического (**E**) и магнитного (**H**) поля, плотность магнитного потока (**B**), плотность потока энергии (**S**) и сила тока в конечностях (I_L). Чувствительность и другие косвенные эффекты контролируются с использованием других величин: ток прикосновения (I_C) и удельная поглощенная энергия (SA) для импульсных полей. Их несложно оценить на практике. В любой ситуации, характеризующейся воздействием ЭМП на человека, измеренные или рассчитанные значения указанных физических величин сопоставляются с соответствующими контролируруемыми уровнями. Соответствие с контролируруемыми уровнями гарантирует соответствие с основными ограничениями. Если измеренное или расчетное значение превышает значение контролируемого уровня, это не всегда означает, что основное ограничение будет превышено. Однако, в случае, если значение контролируемого уровня будет превышено, необходимо проверить соответствие с основными ограничениями и оценить необходимость введения дополнительных защитных мер.

Эти руководства не распространяются на производственные нормативы, которые регламентируют ограничение воздействия ЭМП при определенных условиях тестирования продукции. Кроме того, в документе не рассматриваются методы измерения и оценки физических величин, характеризующих электрические, магнитные и электромагнитные поля. Подробное описание инструментальных и расчетных методов, используемых в дозиметрии НИИ, приводится в ряде документов (NCRP 1981; IEEE 1992; NCRP 1993; DIN VDE 1995).

В руководстве не рассматриваются вопросы, связанные с защитой от эффектов интерференции или воздействия полей на медицинские приборы, такие как, например, металлические протезы, электронные стимуляторы и дефибрилляторы сердца, имплантированные слуховые аппараты. Электромагнитная интерференция с имплантированными электрокардиостимуляторами может наблюдаться на уровнях ниже контролируемых. Эти вопросы более подробно рассматриваются в других публикациях (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Пересмотр руководств будет проводиться в свете новых научных данных о неблагоприятных эффектах для здоровья человека при воздействии переменных электрических, магнитных и электромагнитных полей.

ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ И ЕДИНИЦЫ

Электрические поля создаются электрическими зарядами, тогда как магнитные поля порождаются движущимися электрическими зарядами (электрическими токами). Электрическое поле, **E**, действует на электрический заряд с некоторой силой. Подобным образом, магнитное поле действует на движущиеся электрические заряды. Электрические и магнитные поля характеризуются величиной и направлением (т.е. являются векторами). Единицей напряженности электрического поля является *вольт на метр* ($V\ m^{-1}$). Магнитное поле можно охарактеризовать двумя способами: через плотность магнитного потока, **B**, или через напряженность магнитного поля, **H**. Единицей плотности магнитного потока является *тесла* (Тл), а напряженности магнитного поля – *ампер на метр* ($A\ m^{-1}$). Эти две величины связаны следующим соотношением:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент пропорциональности (магнитная проницаемость); для вакуума, воздуха и немагнитных материалов (включая биологические) значение μ равно $4\pi \cdot 10^{-7}$ *генри на метр* ($Gn\ m^{-1}$). Таким образом, при описании магнитного поля необходимо указать один из параметров: **B** или **H**.

В дальней зоне распространение электромагнитного поля может быть описано с использованием модели плоской волны. Характеристиками плоской волны являются:

- Фронтом волны является плоскость;
- Векторы **E** и **H** и направление распространения волны взаимно перпендикулярны;
- Напряженность электрического (**E**) и магнитного (**H**) поля имеют одинаковую фазу, а отношение амплитуд E/H является постоянным в пространстве. В вакууме, отношение амплитуд E/H составляет 377 Ом, которое является характеристикой волнового сопротивления вакуума.
- Плотность потока энергии, **S**, т.е. мощность электромагнитного излучения, проходящего через единицу площади поверхности, перпендикулярную распространению волны, связана с магнитным и электрическим полями следующим соотношением:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E}\mathbf{H} = E^2/377 = 377H^2, \quad (2)$$

В ближней зоне ситуация более сложная, поскольку максимальное и минимальное значение амплитуд **E** и **H** не достигается в одних и тех же точках вдоль направления распространения электромагнитной волны как в дальней зоне. В ближней зоне электромагнитное поле может быть сильно неоднородным, могут наблюдаться существенные отклонения в значении отношения E/H от значения волнового сопротивления 377 Ом, характерного для плоской волны. Таким образом, в одних областях может наблюдаться практически только электрическое поле, а в других – только магнитное. Количественная оценка воздействия в ближней зоне осложнена тем, что необходимо измерить и электрическое и магнитное поле. В этой ситуации плотность потока энергии не может служить подходящей физической величиной для ограничений воздействия (как в дальней зоне).

Воздействие переменных ЭМП приводит к индукции электрических токов в теле человека и поглощению энергии в тканях, которые зависят от механизмов взаимодействия и частоты поля. Напряженность внутреннего электрического поля и плотность электрического тока связаны между собой законом Ома:

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}, \quad (3)$$

где σ – электрическая проводимость среды.

В настоящих руководствах для различных диапазонов частот и форм волны используются следующие дозиметрические величины:

- Плотность электрического тока, **J**, в диапазоне частот до 10 МГц;
- Сила электрического тока, **I**, в диапазоне частот до 100 МГц;
- Количество энергии, поглощенной в единице массы ткани за единицу времени (удельная поглощенная мощность), **SAR**, в диапазоне частот от 100 кГц до 10 ГГц;
- Удельная поглощенная энергия, **SA**, для импульсных полей в диапазоне частот от 100 МГц до 10 ГГц; и
- Плотность потока энергии, **S**, в диапазоне частот от 10 до 300 ГГц.

Характеристика величин и единиц, которые используются в этих руководствах для ограничения воздействия ЭМП, приведена в таблице 1.

Таблица 1. Электрические, магнитные, электромагнитные и дозиметрические величины и соответствующие единицы международной системы СИ.

Величина	Обозначение	Размерность
Электропроводность	σ	Сименс на метр (См м^{-1})
Сила электрического тока	I	Ампер (А)
Плотность электрического тока	\mathbf{J}	Ампер на кв. метр (А м^{-2})
Частота	F	Герц (Гц)
Напряженность электрического поля	\mathbf{E}	Вольт на метр (В м^{-1})
Напряженность магнитного поля	\mathbf{H}	Ампер на метр (А м^{-1})
Плотность магнитного потока	\mathbf{B}	Тесла (Тл)
Магнитная проницаемость	μ	Генри на метр (Гн м^{-1})
Диэлектрическая проницаемость	ε	Фарад на метр (Ф м^{-1})
Плотность потока энергии	S	Ватт на кв. метр (Вт м^{-2})
Удельная поглощенная энергия	SA	Джоуль на килограмм (Дж кг^{-1})
Удельная поглощенная мощность	SAR	Ватт на килограмм (Вт кг^{-1})

ОСНОВЫ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Настоящие руководства по ограничению воздействия ЭМП на человека разработаны на основе детального обзора всех опубликованных научных данных. Для оценки надежности и обоснованности результатов научных исследований были разработаны специальные критерии (Repacholi and Stolwijk 1991; Repacholi and Cardis 1997). Основой для ограничения воздействия являются только научно обоснованные эффекты. На современном уровне научных знаний возникновение рака в результате длительного воздействия ЭМП не рассматривается в качестве научно доказанного эффекта. Таким образом, основой для ограничения воздействия являлись ранние и промежуточные эффекты воздействия ЭМП на здоровье человека. К таким эффектам относятся стимуляция периферической нервной и мышечной систем; возникновение электрических разрядов и ожогов, вызванных прикосновением к проводникам; повышение температуры ткани в результате поглощения энергии ЭМП. В отношении потенциальных отдаленных эффектов, таких как повышенный риск рака, МКЗНИ считает, что имеющиеся научные данные недостаточны и не могут быть использованы для ограничения воздействия ЭМП. Однако, результаты эпидемиологических исследований свидетельствуют о предположительной, но неубедительной взаимосвязи между возможными канцерогенными эффектами и воздействием электромагнитных полей с частотой 50/60 Гц и плотностью магнитного потока ниже рекомендуемой в этих руководствах.

В руководствах приводится подробный анализ научных исследований, проведенных до настоящего времени, которые формируют основу для установления ограничений воздействия ЭМП. Рассматривается два частотных диапазона переменных ЭМП: низкочастотные поля (до 100 кГц) и высокочастотные поля (от 100 кГц до 300 ГГц). В низкочастотном диапазоне отдельно рассматриваются биологические и медицинские эффекты при воздействии переменных электрических и магнитных полей в диапазоне частот ниже 300 Гц (*extremely low frequency, ELF*). Согласно международной классификации этот диапазон частот охватывает крайне низкие частоты, КНЧ, (3-30 Гц) и сверх низкие частоты, СНЧ, (30-300 Гц). Далее в документе для обозначения переменных полей с частотой ниже 300 Гц используется аббревиатура *ELF*.

В руководствах приведено обобщение результатов *in vitro* исследований, касающихся эффектов кратковременного воздействия *ELF* электромагнитных полей и *ELF* полей с модулированной амплитудой. Несмотря на то, что в опытах *in vitro* наблюдались

кратковременные клеточные и тканевые реакции в ответ на воздействие таких ЭМП, они не характеризовались отчетливой зависимостью «воздействие – эффект». Эти исследования не являются ценными для оценки риска для здоровья человека, так как многие реакции не наблюдались *in vivo*. Таким образом, результаты опытов на клетках и тканях не являются достаточным основанием для оценки возможных эффектов воздействия ЭМП на здоровье человека.

МЕХАНИЗМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМЫ

Установлены три основных механизма взаимодействия переменных электрических и магнитных полей с живой материей (UNEP/WHO/IRPA 1993):

- Взаимодействие с низкочастотными электрическими полями;
- Взаимодействие с низкочастотными магнитными полями;
- Поглощение энергии электромагнитных полей.

Прямое взаимодействие низкочастотных электрических полей с живой материей

Действие внешнего переменного электрического поля на человека вызывает перенос электрических зарядов (электрического тока), поляризацию связанного заряда (возникновение электрических диполей) и переориентацию диполей, присутствовавших в ткани. Величина этих эффектов зависит от электрических свойств тела, таких как электропроводность (определяющая перенос электрических зарядов) и диэлектрическая проницаемость (определяющая степень поляризации). Электропроводность и диэлектрическая проницаемость зависят от типа ткани и частоты приложенного поля. Внешние электрические поля влияют на распределение электрических зарядов на поверхности проводящей ткани и вызывают протекание в организме электрических токов. Распределение зарядов зависит от условий воздействия, размеров и формы тела, а также от расположения тела в электрическом поле.

Прямое взаимодействие низкочастотных магнитных полей с живой материей

Действие внешнего переменного магнитного поля на человека индуцирует электрическое поле и циркулирующий электрический ток внутри организма. Величина индукционных токов зависит от величины внешнего магнитного поля, размера контура, через который протекает ток и электропроводности ткани. При воздействии магнитного поля той же величины и частоты наиболее сильные электрические поля будут индуцироваться в контуре с наибольшими размерами.

Тело человека не является однородным по своим электрическим свойствам. Однако, плотность индукционных токов может быть рассчитана с использованием анатомически и физиологически обоснованных математических моделей человека.

Поглощение энергии электромагнитных полей

Действие низкочастотных электрических и магнитных полей на человека обычно приводит к незначительному поглощению энергии в тканях и нерегистрируемому повышению температуры. Однако, воздействие электромагнитных полей с частотой выше 100 кГц может привести к значительному поглощению энергии в ткани и повышению температуры. В целом, воздействие однородного электромагнитного поля (плоской волны) приводит к неравномерному поглощению энергии в теле человека, которое должно быть оценено с использованием дозиметрических методов и расчетов.

В зависимости от характера поглощения энергии в теле человека электромагнитные поля могут быть подразделены на четыре группы (Durney et al. 1985):

- ЭМП с частотой от 100 кГц до порядка 20 МГц. Поглощение энергии ЭМП такой частоты в туловище человека существенно снижается с увеличением частоты; значительное поглощение энергии ЭМП такой частоты может происходить в шее и нижних конечностях;
- ЭМП с частотой от порядка 20 МГц до 300 МГц. Для ЭМП такой частоты характерно значительное поглощение энергии во всем теле человека, особенно значительное локальное резонансное поглощение (например, в голове);
- ЭМП с частотой от порядка 300 МГц до нескольких ГГц. Для ЭМП такой частоты характерно локальное неоднородное поглощение энергии; и
- ЭМП с частотой выше 10 ГГц. Поглощение энергии таких ЭМП происходит на поверхности тела.

В биологических тканях значение SAR пропорционально квадрату напряженности внутреннего электрического поля. Для оценки среднего значения SAR и распределения значений SAR в ткани используются расчетные методы или инструментальные измерения в лабораторных условиях. Значения SAR зависят от следующих факторов:

- Параметры падающего поля, например, частота, интенсивность, поляризация, геометрическая конфигурация «источник-объект» (ближняя или дальняя зона);
- Характеристики облучаемого тела, например, его размер, внутренняя и внешняя геометрия, диэлектрические свойства различных составляющих его тканей; и
- Эффекты экранирования или отражения от других объектов, находящихся в поле вблизи облучаемого тела.

Значение SAR для всего тела человека достигает максимальной величины в случае, когда ось тела человека совпадает с направлением вектора напряженности электрического поля в условиях воздействия плоской волны (т.е. в дальней зоне). Количество поглощенной энергии зависит от нескольких факторов, в том числе от размеров облучаемого тела. Для электрически изолированного «стандартного условного человека» [взрослый мужчина ростом 176 см и весом 73 кг] (ICRP 1994) частота резонансного поглощения составляет порядка 70 МГц. Для более высоких людей, частота резонансного поглощения несколько ниже, а для взрослых людей невысокого роста, детей и новорожденных, а также людей в сидячем положении ее значение может превышать 100 МГц. Рекомендуемые контролируемые уровни для электрических полей также учитывают частотную зависимость поглощения энергии в теле человека. Для заземленного человека значения резонансных частот практически в два раза ниже (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Если источником ЭМП является оборудование, работающее с частотой выше 10 МГц (например, диэлектрические обогреватели, мобильные телефоны), то воздействие на человека может происходить в условиях ближней зоны. В ближней зоне зависимость поглощения энергии от частоты электромагнитной волны имеет другой характер, чем в условиях дальней зоны. Кроме того, в определенных условиях воздействие электрического и магнитного поля неравнозначно. Например, при пользовании мобильным телефоном преобладает воздействие магнитного поля на человека.

Для оценки воздействия электромагнитных полей в ближней зоне особенно ценными являются расчетные методы и измерения индукционных токов в организме человека и напряженности поля в тканях. Это было продемонстрировано на примере воздействия таких источников ЭМП, как мобильные телефоны, переносная радиосвязь, радиовещательные антенны, средства связи на судах и диэлектрические обогреватели (Kuster and Balzano 1992, Dimbylow and Mann 1994; Jokela et al. 1994; Gandhi 1995; Tofani et al. 1995). В этих

исследованиях было показано, что при воздействии ЭМП в условиях ближней зоны наблюдается высокое локальное поглощение энергии (т.е. высокие значения SAR, например, в голове, запястьях, лодыжках), и что значения SAR для всего тела или определенных частей тела зависят от расстояния от источника высокочастотного поля. Необходимо отметить, что измеренные значения SAR не противоречили расчетным значениям. Среднее значение SAR для всего тела человека и локальные значения SAR являются удобными дозиметрическими величинами при сравнении эффектов, наблюдающихся в различных условиях воздействия. Подробное обсуждение SAR приводится в публикации UNEP/WHO/IRPA (1993).

При частоте выше порядка 10 ГГц глубина проникновения электромагнитной волны в биологические ткани очень мала, поэтому SAR не может быть использована для оценки поглощенной энергии. В этом случае, наиболее подходящей дозиметрической величиной является плотность потока энергии (Вт м^{-2})

МЕХАНИЗМЫ КОСВЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭМП НА ЧЕЛОВЕКА

Существует два механизма косвенного воздействия электромагнитных полей на человека:

- Возникновение электрического тока в результате контакта человека с объектом, обладающим различным электрическим потенциалом (т.е., когда тело человека или объект обладает зарядом в результате воздействия ЭМП); и
- Воздействие ЭМП на медицинские приборы, носимые на теле, или имплантированные в организм человека (не рассматривается в этом документе).

В результате воздействия ЭМП на проводник, индуцированный электрический ток проходит через тело человека, находящегося с ним в контакте (Tenforde and Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). Величина и пространственное распределение такого тока зависит от частоты поля, размера проводника, размеров тела человека и площади соприкосновения. В случае, если человек и проводник находятся под воздействием сильного поля и расположены в непосредственной близости, могут наблюдаться электрические разряды (искры).

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ (с частотой до 100 кГц)

В этом разделе приводится обзор научных данных о биологических и медицинских эффектах воздействия электрических и магнитных полей с частотой до 100 кГц. Основным механизмом такого воздействия является индукция электрических токов в биологических тканях. Биологические основы для ограничения воздействия полей с частотой более 0 до 1 Гц приведены в ICNIRP (1994). Наиболее подробные обзоры опубликованы в работах (NRPB 1991, 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993; Blank 1995; NAS 1996; Polk and Postow 1996; Ueno 1996).

Эффекты прямого воздействия электрических и магнитных полей

Эпидемиологические исследования. К настоящему времени опубликовано большое число обзоров эпидемиологических исследований риска рака в результате воздействия полей промышленной частоты (NRPB 1992, 1993, 1994b; ORAU 1992; Savitz 1993; Heath 1996; Stevens and Davis 1996; Tenforde 1996; NAS 1996). Подобные обзоры были опубликованы и по воздействию ЭМП на репродуктивную функцию (Chernoff et al., 1992; Brent et al., 1993; Shaw and Croen 1993; NAS 1996; Tenforde 1996).

Влияние на репродуктивную функцию. Эпидемиологические исследования исходов беременностей у женщин, работающих с видеомониторами (ВДТ), не выявили убедительных доказательств неблагоприятного воздействия ЭМП на репродуктивную функцию (Bergqvist 1993; Shaw and Croen 1993; NRPB 1994a, Tenforde 1996). Так, например, результаты мета-анализа нескольких исследований, проведенных в группах женщин, работающих и не работающих с видеомониторами, не выявили избыточного риска спонтанных аборт или пороков развития плода (Shaw and Croen 1993). В двух других исследованиях, в которых оценки воздействия базировались на результатах прямых измерений электрических и магнитных полей от ВДТ, были получены противоречивые результаты. Так, в исследовании Lindbohm et al. (1992) было высказано предположение о возможной связи между воздействием ELF магнитных полей и частотой спонтанных аборт, а в исследовании Schnott et al. (1991) такая связь не была обнаружена. В проспективном исследовании, характеризовавшимся значительной статистикой по числу случаев, высокой степенью участия и детальной оценкой воздействия (Bracken et al. 1995), не было обнаружено связи между воздействием ELF полей и весом новорожденного и процессом внутриутробного развития. Кроме того, в этом исследовании не было обнаружено ассоциации между неблагоприятными исходами беременностей и воздействием ЭМП в группе женщин с высокими уровнями воздействия. Для оценки воздействия проводили измерения пропускной способности линий электропередач внутри домов, индивидуальные измерения воздействия ЭМП в течение недели и суточные измерения в доме, анализ индивидуальных свидетельств об использовании одеял с электрообогревом, подогреваемых водных кроватей и видеомониторов. Результаты большинства исследований, проведенных к настоящему времени, не свидетельствовали о неблагоприятном воздействии ЭМП от ВДТ на репродуктивную функцию у женщин в производственных условиях воздействия (NRPB 1994a, Tenforde 1996).

Исследования риска рака при проживании в зоне воздействия ELF полей. До настоящего времени не утихают дискуссии о возможной связи между воздействием ELF магнитных полей и повышенным риском рака. После публикации Wertheimer and Leeper (1979), в которой была показана связь между детской раковой смертностью и близостью домов к распределительным линиям электропередач, которые классифицируются исследователями как *конфигурации высоких токов*, вышло несколько публикаций, касающихся этой проблемы. В оригинальном исследовании была выдвинута основная гипотеза о том, что воздействие магнитного поля с частотой 50/60 Гц в местах проживания людей от внешних источников поля, таких как линии электропередач, может быть связано с повышенным риском рака у детей.

К настоящему времени было проведено большое количество исследований риска детского рака и воздействия магнитных полей промышленной частоты в доме от расположенных поблизости линий электропередач. В этих исследованиях оценки уровней воздействия магнитного поля были получены на основе кратковременных измерений магнитного поля в доме или расчетными методами с учетом расстояния дома от линий электропередач или их конфигурации; в некоторых исследованиях учитывалась нагрузка. Наиболее согласованные результаты были получены по риску детской лейкемии. В 8 из 13 исследований (Wertheimer and Leeper 1979; Fulton et al. 1980; Myers et al. 1985; Tomenius 1986; Savitz et al. 1988; Coleman et al. 1989; London et al. 1991; Feychting and Ahlbom 1993; Olsen et al., 1993; Verkasalo et al. 1993; Michaelis et al. 1997; Linet et al. 1997; Tynes and Haldorsen 1997) были получены оценки относительного риска в диапазоне от 1,5 до 3.

Однако, прямые измерения магнитного поля и расчетные значения, полученные на основе данных о проходящей вблизи дома линии электропередач, не являются надежными оценками воздействия на человека, т.к. были получены после постановки диагноза. Несмотря на то, что результаты действительно предполагают наличие связи между воздействием магнитного поля и риском лейкемии, их неопределенность связана с

незначительностью исследуемых групп и использованием корреляции между величиной магнитного поля и расположением домов к линиям электропередач при оценке воздействия (Feychting et al. 1996).

Этиология различных типов детского рака мало изучена, однако, попытки учесть влияние потенциальных мешающих факторов, таких как социально-экономический статус и загрязнение воздуха выхлопными газами автомобильного транспорта, практически не повлияли на результаты. В других исследованиях не было обнаружено возможной связи между использованием электроприборов (в основном электроодеял, электрогрелок) и неблагоприятными медицинскими эффектами, включая рак (Preston-Martin et al. 1988; Verreault et al. 1990; Vena et al. 1991, 1994; Li et al. 1995). Только в двух исследованиях по методу «случай-контроль» была получена связь между использованием электроприборов и риском лейкемии в детском возрасте. В одном из них, проведенном в Денвере (Savitz et al. 1990), была получена предположительная связь между детской лейкемией и использованием электроодеяла матерью во время беременности; а в другом, проведенном в Лос-Анджелесе (London et al. 1991), была обнаружена связь между лейкемией и использованием детьми фенов и просмотром черно-белого телевизора.

Относительная согласованность результатов, свидетельствующих о наличии связи между лейкемией и близостью домов к линиям электропередач, позволила Комитету национальной академии наук США (NAS) сделать вывод о том, что дети, проживающие вблизи линий электропередач, относятся к группе повышенного риска лейкемии (NAS 1996). Из-за незначительного объема изучаемых групп оценки относительного риска в индивидуальных исследованиях характеризовались широкими доверительными интервалами. Однако, при анализе сгруппированных данных были получены согласованные результаты с общей оценкой относительного риска 1,5 (NAS 1996). С другой стороны, результаты нескольких исследований, в которых оценки уровней воздействия были получены на основе кратковременных измерений магнитных полей, не свидетельствовали о возможной связи между воздействием полей частотой 50/60 Гц и риском детской лейкемии или другой формы рака. Таким образом, Комитетом не было получено убедительных доказательств того, что риск рака был связан с воздействием магнитных полей, т.к. с использованием результатов прямых измерений магнитного поля, проведенных в домах для группы случаев и контрольной группы, такая ассоциация не была обнаружена. Было выдвинуто предположение о том, что наблюдаемая связь обусловлена влиянием некоторого мешающего фактора, связанного с проживанием вблизи линий электропередач, однако, вероятные кандидаты роль такого фактора не были определены.

После публикации обзора NAS были получены результаты исследования, проведенного в Норвегии (Tynes and Haldorsen 1997). В это исследование были включены 500 случаев детского рака. Для каждого человека были оценены среднегодовые уровни воздействия магнитных полей от находящихся поблизости линий электропередач. В результате исследования не было обнаружено ассоциации между риском лейкемии и уровнем полей в местах проживания детей на момент постановки диагноза. Учет таких факторов, как расположение дома относительно линий электропередач, уровни воздействия в первый год жизни ребенка, облучение матери во время зачатия и воздействие уровней, превышающих медианное значение уровней воздействия магнитных полей для контрольной группы, не позволило выявить связь с лейкемией, раком головного мозга или лимфомой. Однако, число случаев в исследовании было незначительным.

Кроме того, после опубликования обзора NAS были получены результаты исследования, проведенного в Германии (Michaelis et al., 1997), которое было выполнено по методу «случай-контроль» для детской лейкемии. В группу случаев было включено 129 человек, а в группу контроля – 328 человек. Для оценки воздействия были использованы результаты суточных измерений уровней магнитного поля в спальне ребенка в доме, где он

проживал наибольший период времени до постановки диагноза. В исследовании была получена оценка относительного риска 3,2 для магнитных полей более 0,2 мкТл.

В США было проведено большое исследование по методу «случай-контроль» (638 человек в группе случаев и 620 человек в группе контроля) с целью оценки возможной связи между детской острой лимфоидной лейкемией и воздействием магнитных полей с частотой 60 Гц (Linet et al. 1997). В этом исследовании оценивалось средневзвешенное значение измерений магнитного поля в спальне в течение суток и в различных точках в доме в течение 30 секунд. Измерения проводились в домах, где ребенок проживал более 70% времени в течение 5-летнего периода до постановки диагноза или соответствующего периода времени для группы контроля. Для пар случай-контроль, которые не переезжали в течение нескольких лет до постановки диагноза (т.е. постоянно проживали в одном месте) были оценены *wire-codes*. Всего было сформировано 416 таких пар, для которых можно было оценить уровни воздействия. В результате не было получено связи между *wire-code* и лейкемией. Однако, более интригующие выводы были сделаны при анализе результатов измерений магнитных полей. Так, при воздействии полей с плотностью магнитного потока 0,2 мкТл в парном и непарном анализе были получены оценки относительного риска 1,2 и 1,5 соответственно. При воздействии полей 0,3 мкТл непарная оценка относительного риска составила 1,7 на основе 45 случаев. Таким образом, предполагается наличие положительной ассоциации между воздействием магнитных полей и риском лейкемии. Это исследование является определяющим с точки зрения объема выборки, количества людей в группе с высокими уровнями воздействия магнитных полей, своевременного проведения измерений относительно возникновения лейкемии (обычно в течение 24 месяцев после постановки диагноза), привлечения дополнительных данных для оценки воздействия и качества проведенного анализа, учитывающего влияние мешающих факторов. К потенциальным недостаткам этого исследования следует отнести: процедуру формирования контрольной группы, невысокую степень участия в исследовании и методы, использованные для статистического анализа данных. Кроме того, инструментальные методы, которые были использованы в этом исследовании, не позволили учесть переходные поля или высшие гармоники. В целом, вклад этого исследования таков, что его результаты в комбинации с результатами других исследований только бы ослабили (но необязательно признали недействительной) ранее наблюдавшуюся ассоциацию между лейкемией и воздействием ELF магнитного поля.

В течение нескольких лет проявлялся интерес к вопросу об ассоциации между воздействием магнитных полей и детским раком головного мозга – вторым по встречаемости типом рака у детей. В трех исследованиях, проведенных после публикации обзора NAS, не подтвердилось наличия ассоциации между раком головного мозга и воздействием магнитных полей в детском возрасте от таких источников, как линии электропередач или электроодеяла; различные дозиметрические подходы не повлияли на результаты исследований (расчетные или *wire-codes*) (Guenel et al. 1996; Preston-Martin et al. 1996a, b; Tynes and Haldorsen 1997).

Данные по раку у взрослых в результате воздействия магнитных полей в местах проживания незначительны (NAS 1996). К настоящему времени опубликовано несколько исследований (Wertheimer and Leeper 1979; McDowall 1985; Seversen et al. 1988; Coleman et al. 1989; Schreiber et al. 1993; Feychting and Ahlbom 1994; Li et al. 1996; Verkasalo 1996; Verkasalo et al. 1996), которые были проведены в небольших группах и на основе которых сложно сделать какие-либо выводы.

МКЗНИ считает, что для формирования научной основы для разработки рекомендаций по ограничению воздействия, результаты эпидемиологических исследований связи между воздействием электромагнитных полей и раком, включая лейкемию в детском возрасте, не являются достаточно надежными без поддержки экспериментальных исследований. Эта точка зрения согласуется выводами, приводимыми в последних обзорах (NRPB 1992, 1994b; NAS 1996; CRP 1977).

Воздействие в производственных условиях. Для оценки возможной связи между воздействием ELF полей и риском рака у персонала электротехнических предприятий было проведено несколько эпидемиологических исследований. Основой для первых исследований послужила информация, содержащаяся в базах данных предприятий. Эта информация включала данные свидетельств о смерти, данные о типе работы на предприятии для каждого человека и данные по раковой смертности. Для оценки уровней воздействия были выделены группы людей по типу работы на производстве в соответствии с предполагаемыми уровнями воздействия магнитных полей. В первом исследовании (Milham 1982) был обнаружен повышенный риск смертности от лейкемии у персонала электротехнического производства. В последующих исследованиях (Savitz and Ahlborn, 1994) был отмечен повышенный риск рака различных органов. При этом в разных исследованиях повышенная частота наблюдалась для разных локализаций рака, особенно если рассматривались его подтипы. Так, были опубликованы данные о повышенном риске смертности от различных типов лейкемии и рака нервной ткани, и, в нескольких случаях, от рака молочной железы у женщин и мужчин (Demers et al. 1991; Matanoski et al. 1991; Tynes et al. 1992; Loomis et al. 1994). В целом, эти исследования характеризовались не только противоречивостью результатов, но и грубыми оценками уровней воздействия и недостатками эпидемиологического анализа данных, а именно, в этих исследованиях не учитывалось влияние мешающих факторов, таких, как, например, воздействие бензола на рабочем месте.

В последующих исследованиях были предприняты попытки преодолеть недостатки дозиметрических оценок оригинальных исследований путем измерения воздействия ELF полей на рабочем месте с привлечением данных о продолжительности работы (Floderus et al. 1993; Theriault et al. 1994; Savitz and Loomis 1995). В результате этих исследований у персонала был обнаружен повышенный риск рака, однако, по локализациям рака были получены противоречивые результаты. В работе Floderus et al. (1993) обнаружена значимая связь с лейкемией; такая ассоциация наблюдалась и в исследовании Theriault et al. (1994), но никакой связи не было обнаружено в работе Savitz and Loomis (1995). При рассмотрении подтипов лейкемии наблюдались еще более сильные противоречия. К сожалению, недостатком этих исследований являлась незначительность исследуемых групп. Относительно рака нервной ткани, в работе Floderus et al. (1993) был обнаружен избыток глиобластомы (астроцитомы III-IV), однако исследования Theriault et al. (1994) и Savitz and Loomis (1995) свидетельствовали только о возможном повышении глиомы (астроцитомы I-II). Таким образом, если связь между воздействием магнитных полей в производственных условиях и раком действительно существует, то в этих исследованиях следовало ожидать более согласованных результатов и более сильных ассоциаций, т.к. они базируются на более надежных данных для оценки воздействия магнитного поля на человека.

В исследованиях, описанных выше, также изучалась возможная связь между воздействием электрических полей и раком. У персонала трех подразделений электроснабжения, которые были включены в исследование Theriault et al. (1994) о воздействии магнитных полей, также анализировались данные, касающиеся воздействия электрических полей. В одном из подразделений, персонал, у которого была диагностирована лейкемия, наиболее часто подвергался воздействию электрических полей, чем персонал из контрольной группы. Кроме того, ассоциация была сильнее в группе, которая подвергалась воздействию сильных магнитных и электрических полей (Miller et al. 1996). У персонала из второго подразделения не обнаружено ассоциации между лейкемией и высоким кумулятивным воздействием электрических полей на рабочем месте, однако в нескольких анализах была показана ассоциация с раком головного мозга (Guenel et al. 1996). Кроме того, была выявлена ассоциация с раком кишечника, однако, в других исследованиях, проведенных на больших выборках персонала электроэнергетических компаний, такой тип рака не был обнаружен. У персонала третьего подразделения, не наблюдалось ассоциации между воздействием сильных электрических полей и раком головного мозга или лейкемией,

однако это исследование было небольшим и характеризовалось меньшей способностью обнаружения небольших изменений, если таковые существовали (Baris et al., 1996).

В исследовании Sobel and Davanipour (1996) было высказано предположение о наличии ассоциации между болезнью Альцгеймера и воздействием магнитных полей на рабочем месте, однако, этот эффект не был подтвержден.

Лабораторные исследования. В следующих разделах представлен обзор и критическая оценка исследований воздействия переменных электрических и магнитных полей с частотой ниже 100 кГц в лабораторных условиях. Представлены результаты, полученные в исследованиях на добровольцах в условиях контролируемого воздействия, и результаты лабораторных исследований на клеточном и тканевом уровнях и на животных.

Исследования на добровольцах. При воздействии переменного электрического поля человек может ощущать электрический заряд, создаваемый на поверхности тела. В нескольких исследованиях было показано, что большинство людей могут ощущать воздействие 50/60 Гц электрических полей с напряженностью выше 20 кВ м⁻¹, однако более чувствительные люди могут ощущать воздействие полей с напряженностью ниже 5 кВ м⁻¹ (UNEP/WHO/IRPA 1984; Tenforde 1991).

При воздействии комбинированных 60-Гц электрических и магнитных полей (9 кВ м⁻¹, 20 мкТл) у добровольцев наблюдались небольшие изменения в работе сердца (Cook et al. 1992; Graham et al. 1994). Сердцебиение в период покоя незначительно, но статистически значимо снижалось (на 3-5 ударов в минуту) в течение или сразу после воздействия. Такая реакция со стороны сердца не наблюдалась при воздействии более сильных (12 кВ м⁻¹, 30 мкТл) или слабых (6 кВ м⁻¹, 10 мкТл) полей и снижалась, если человек знал о воздействии. Ни один из исследуемых людей не ощущал присутствия поля. Кроме того, в этих исследованиях не было получено согласованных результатов по выполнению тестов на восприятие и чувствительность в условиях воздействия полей.

В лабораторных исследованиях с участием добровольцев, которые подвергались воздействию полей с частотой 50 Гц в диапазоне 2-5 мТл, не наблюдалось неблагоприятных физиологических или психологических эффектов (Sander et al. 1982; Ruppe et al. 1995). В исследованиях, проведенных Sander et al. (1982) и Graham et al. (1994), не наблюдалось изменений в биохимическом анализе крови, в количестве кровяных клеток, концентрации газов в крови, уровнях лактата, в электрокардиограмме, электроэнцефалограмме, температуре кожи и уровнях циркулирующих гормонов. В других исследованиях на добровольцах также не было обнаружено изменений в концентрации мелатонина в крови в ночное время при воздействии магнитных полей с частотой 60 Гц (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Достаточно интенсивные ELF магнитные поля могут непосредственно влиять на возбудимость периферической нервной и мышечной систем. Короткие импульсы магнитного поля используются в клинике для стимуляции нервных окончаний в конечностях с целью проверки целостности нейронных цепей. Возбудимость периферической нервной и мышечной систем наблюдалась у добровольцев при воздействии градиентных магнитных полей с частотой 1 кГц в экспериментальных системах, использующих методы магнитно-резонансного изображения. Пороговые значения плотности магнитного потока составили несколько мТл, а соответствующие значения плотности индукционного электрического тока в периферических тканях составили около 1 А м⁻² от импульсных магнитных полей, создаваемых быстро переключаемыми градиентами поля. Воздействие переменных магнитных полей, которые индуцируют в ткани плотность тока выше 1 А м⁻², приводит к возбуждению нейронов и способно вызвать необратимые биологические эффекты, такие как фибрилляция сердечных желудочков (Tenford and Kaune 1987; Reilly 1989). Анализ результатов электромиографии на руке человека (Polston et al. 1982) показал, что стимулирование срединного нерва происходит при воздействии импульсного магнитного

поля с dB/dt выше 10^4 Тл с^{-1} . При этом было показано, что продолжительность магнитного стимулирования является важным параметром в стимуляции возбудимых тканей.

В экспериментах на добровольцах, связанных с изучением визуальной памяти и мыслительных функций, могут быть получены пороговые значения плотности тока ниже 100 mA m^{-2} . Так, у добровольцев, которые находились под воздействием слабых электрических токов, проходящих через электроды, приложенные к голове и плечам, были отмечены изменения в скорости реакции при выполнении тестов, требующих сложных умозаключений; плотности электрического тока изменялись в диапазоне от 10 до 40 mA m^{-2} (Stollery 1986, 1987). Во многих исследованиях добровольцы свидетельствовали о визуальном восприятии слабых мерцающих вспышек света, известных как магнитные фосфены, при воздействии ELF магнитных полей выше 3-5 мТл (Silny 1986). Эти визуальные эффекты также могут быть индуцированы прямым воздействием слабых электрических токов на голову человека. При воздействии магнитных полей с частотой 20 Гц пороговое значение плотности тока для индукции фосфенов в сетчатке составляет порядка 10 mA m^{-2} . Это значение выше типичных плотностей эндогенного тока в электрически возбудимых тканях. Более высокие значения порога наблюдались при воздействии полей с частотой ниже и выше 20 Гц (Lovsund et al. 1980; Tenforde 1990).

Исследования воздействия магнитных полей с частотой 50 Гц на визуально вызванные потенциалы головного мозга показали, что пороговое значение плотности магнитного потока для этого эффекта составляет порядка 60 мТл (Silny 1986). Согласованные данные были получены в исследовании Sander et al. (1982), в котором не было обнаружено воздействия магнитного поля 5 мТл с частотой 50 Гц и воздействия комбинированных электрических и магнитных полей с частотой 60 Гц до 12 kV m^{-1} и 30 мкТл соответственно на появление визуально вызванных потенциалов (Graham et al. 1994).

Исследования на клетках и животных. Несмотря на то, что было проведено большое количество исследований, предпринятых с целью обнаружения биологических эффектов воздействия ELF электрических и магнитных полей, только в нескольких систематических исследованиях были определены пороговые характеристики поля, при которых происходят существенные изменения биологических функций. Установлено, что индукционный электрический ток может непосредственно приводить в возбуждение нервную и мышечную системы при плотности тока, превышающей пороговое значение (UNEP/WHO/IRPA 1987; Bernhardt 1992; Tenforde 1996). При плотностях тока, при которых не происходит стимуляции возбудимых тканей, тем не менее, возможно прямое воздействие на электрические процессы и возбудимость нейронов. Известно, что центральная нервная система чувствительна к внутренним электрическим полям, создаваемым прилегающими нервными клетками, уровни которых ниже уровней, необходимых для возбуждения.

Во многих исследованиях предполагалось, что слабые электрические сигналы в ELF диапазоне могут воздействовать на электрический потенциал клеточных мембран, индуцируя протекание биохимических реакций в цитоплазме, что в свою очередь приводит к изменению клеточных функций и пролиферативных свойств. С использованием простых моделей поведения отдельных клеток в слабых полях было показано, что для превышения уровня эндогенного физического и биологического шума в клеточных мембранах электрический сигнал во внеклеточном поле должен превышать $10\text{-}100 \text{ mV m}^{-1}$ (что соответствует плотности индукционного электрического тока порядка $2\text{-}20 \text{ mA m}^{-2}$) (Astumian et al. 1995). Предполагается, что в реакциях на индуцированное ELF поле при 100 mV m^{-1} и ниже, могут изменяться некоторые структурные и функциональные свойства мембран (Sienkiewicz et al. 1991; Tenforde 1993). При воздействии индукционных электрических полей порядка 10 mV m^{-1} и ниже (что соответствует плотности индукционного электрического тока 2 mA m^{-2} и ниже) наблюдались нейроэндокринные изменения (например, угнетение синтеза мелатонина в ночное время) (Tenforde 1991, 1996). Однако неясно, может

ли такое биологическое действие низкочастотных полей приводить к неблагоприятным эффектам для здоровья человека.

Показано, что воздействие индукционных электрических полей и токов на уровнях, превышающих эндогенные биоэлектрические сигналы в тканях, может привести к некоторым физиологическим эффектам, тяжесть которых увеличивается с увеличением плотности индукционного тока (Bernhardt 1979; Tenforde 1996). Так, при плотности индукционных электрических токов в диапазоне 10-100 мА м⁻² были отмечены тканевые эффекты и изменения мыслительных функций мозга (NRPB 1992; NAS 1996). При плотности тока от 100 до нескольких сотен мА м⁻² и частотах внешнего поля от 10 Гц до 1 кГц превышает порог нервной и нервно-мышечной возбудимости. Пороговое значение плотности электрического тока значительно увеличивается при частотах ниже нескольких Гц и выше 1 кГц. При очень высоких значениях плотности тока, превышающих 1 А м⁻², могут происходить тяжелые и угрожающие жизни эффекты, такие как, например, экстрасистолы, фибрилляция сердечных желудочков, мышечный столбняк и изменения в дыхательной системе. Тяжесть и вероятность необратимости тканевых эффектов увеличивается при хроническом воздействии индуцированных электрических токов, превышающих уровни 10-100 мА м⁻². Таким образом, считается целесообразным ограничить воздействие полей на человека с частотой от нескольких Гц до 1 кГц, которые индуцируют электрический ток с плотностью не выше 10 мА м⁻² в голове, шее и туловище.

Предполагается, что магнитно-механическое воздействие на биогенные магнитные частицы головного мозга может запустить механизм преобразования сигналов от ELF магнитных полей. В работе Kirschvink et al. (1992b) предложена модель, в которой силы, действующие со стороны ELF магнитного поля на магнетит, представлены как силы, открывающие и закрывающие ионные каналы в мембранах, чувствительные к давлению. Однако, сложность модели заключается в том, что частицы магнетита немногочисленны относительно числа клеток в ткани головного мозга. Например, в 1 г ткани головного мозга человека содержится несколько миллионов частиц магнетита, которые образуют 10⁵ дискретных кластеров по 5-10 частиц в каждом (Kirschvink et al. 1992a). Число клеток в ткани головного мозга превышает количество клеток магнетита в 100 раз, таким образом, очень сложно предсказать, как взаимодействие ELF полей с магнитными кристаллами может повлиять на значительное число ионных каналов в головном мозге. Для прояснения этого вопроса необходимо проведение дальнейших исследований с целью определения биологической роли магнетита и возможных механизмов, в которых этот минерал может играть роль в преобразовании ELF магнитных сигналов.

Важным вопросом в оценке эффектов электромагнитных полей является воздействие на плод и развивающийся организм. Опубликованные научные данные свидетельствуют о том, что воздействие низкочастотных полей вероятно не приводит к неблагоприятным эффектам пренатального и постнатального развития у млекопитающих (Chernoff et al. 1992; Brent et al. 1993; Tenforde 1996). Более того, полученные к настоящему времени данные указывают на то, что соматические мутации и генетические эффекты вероятно не возникают в результате воздействия электрических и магнитных полей с частотой ниже 100 кГц (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993).

К настоящему времени опубликовано много работ о влиянии ELF полей на свойства клеточных мембран (ионный транспорт и взаимодействие митогенов с рецепторами, расположенными на поверхности клеток), клеточные функции и ростовые процессы (например, повышенная пролиферация и изменения в метаболизме, экспрессии генов, биосинтезе белков и активности энзимов), которые наблюдались в опытах *in vitro* (Cridland 1993; Sienkiewicz et al. 1993; Tenforde 1991, 1992, 1993, 1996). Значительное внимание уделялось изучению влияния низкочастотных полей на транспорт ионов Ca⁺⁺ через клеточные мембраны и внутриклеточную концентрацию этого иона (Walleczek and Liburdy 1990; Liburdy 1992; Walleczek 1992), на информационную (матричную) РНК и процессы

синтеза белков (Goodman et al. 1983; Goodman and Henderson, 1988, 1991; Greene et al. 1991; Phillips et al. 1992), а также на активность ферментов, таких как орнитин декарбоксилаза (ОДК), которые связаны с пролиферацией клеток и прогрессированием рака (Byus et al., 1987, 1988; Litovitz et al. 1991, 1993). Однако, прежде чем использовать эти результаты для нормирования воздействия ELF полей, необходимо оценить их воспроизводимость и значимость в развитии рака или других неблагоприятных эффектов для здоровья человека. Это связано с трудностями повторения некоторых ключевых результатов проведенных исследований, связанных с воздействием полей на экспрессию генов и синтез белков (Lacy-Hilbert et al. 1995; Saffer and Thurson 1995). Авторы повторных исследований выделили несколько недостатков оригинальных исследований, которые включали недостаточный температурный контроль, отсутствие подходящих образцов для внутреннего контроля и применение оборудования с низким разрешением для анализа транскрипции информационной РНК. Кратковременное увеличение активности ОДК, регистрируемое в ответ на воздействие поля, было незначительным и не было связано с *de novo* синтезом этого энзима (в отличие от химических промоторов рака, таких как форбол-эфир) (Byus et al. 1988). Исследования с использованием ОДК обычно включали этап подготовки клеток. Таким образом, необходимо проведение дополнительных исследований с целью изучения воздействия полей на активность ОДК *in vivo*. В одном из исследований на тканях молочной железы у крыс было выдвинуто предположение о проявлении эффектов воздействия поля на активность ОДК (Mevissen et al. 1995).

К настоящему времени не доказано воздействия ELF поля на структуру ДНК и хроматина, что не позволяет ожидать мутаций и злокачественных трансформаций. Это подтверждается результатами лабораторных исследований, спланированных с целью обнаружения повреждений ДНК и хромосом, случаев мутаций и повышенной частоты трансформаций при воздействии ELF полей (NRPB 1992; Murphy et al. 1993; McCann et al. 1993; Tenforde 1996). Отсутствие влияния на структуру хромосом может свидетельствовать о том, что если ELF поля влияют на процесс канцерогенеза, то они более вероятно действуют как промоторы, а не инициаторы, усиливая пролиферацию генетически измененных клеток, а не вызывая первичные повреждения в ДНК или хроматине. Влияние на развитие рака может быть опосредовано эпигенетическими эффектами ELF полей, такими как, изменение в сигнальных системах клеток, контролирующих клеточный цикл, или экспрессия генов. Таким образом, современные исследования направлены на обнаружение возможного стимулирующего влияния ELF полей на развитие рака после инициирования процесса химическим канцерогеном.

Процессы роста злокачественных клеток и развития трансплантированных раковых клеток изучались *in vitro* на клетках грызунов. Эти исследования не подтвердили возможного канцерогенного эффекта ELF полей (Tenforde 1996). В нескольких исследованиях, более значимых в отношении человека, изучалось стимулирование развития опухолей *in vivo* при воздействии ELF магнитных полей на кожу, печень, головной мозг и молочные железы у грызунов. В трех исследованиях (McLean et al. 1991; Rannug et al. 1993a, 1994) не было обнаружено влияния продолжительного или периодического воздействия магнитных полей промышленной частоты на стимулирование роста опухоли на коже после ее инициирования химическим агентом. Для полей с плотностью магнитного потока 2 мТл с частотой 60 Гц был обнаружен синергетический эффект с форбол-эфиром в стимулировании рака кожи у мышей на начальных стадиях эксперимента, однако при завершении эксперимента на 23 неделе этот эффект не являлся статистически значимым (Stuchly et al. 1992). Предыдущие исследования этих же авторов показали, что воздействие магнитного поля с частотой 60 Гц и плотностью магнитного потока 2 мТл не способствовало росту раковых клеток кожи, инициированных ДМБА (McLean et al. 1991).

В экспериментах не выявлено прямого или синергетического стимулирующего действия полей с частотой 50 Гц и плотностью магнитного потока от 0,5 до 50 мкТл на рост

трансформированных клеток в печени, инициированных химическим канцерогеном и стимулированных форбол-эфиром у крыс с частично удаленной печенью (Rannug et al. 1993b, c).

В других исследованиях высказано предположение о стимулирующем действии магнитных полей промышленной частоты в диапазоне 0,01-30 мТл на развитие рака молочной железы, инициированного химическим агентом, у грызунов (Beniashvili et al. 1991; Loscher et al. 1993; Mevissen et al. 1993, 1995; Baum et al. 1995; Loscher and Mevissen 1995). Была высказана гипотеза, что наблюдаемая повышенная частота рака молочной железы связана с индуцированным полем угнетением синтеза мелатонина шишковидным телом, и как следствие, с повышением уровня стероидных гормонов (Stevens 1987; Stevens et al. 1992). Однако, чтобы сделать вывод о стимулирующем эффекте ELF полей для рака молочной железы необходимо проведение повторных исследований в независимых лабораториях. Необходимо отметить, что в исследованиях, выполненных в последнее время, не обнаружено влияния магнитных ELF полей на уровни мелатонина у человека (Graham et al. 1996, 1997; Selmaoui et al. 1996).

Эффекты косвенного воздействия электрических и магнитных полей

Эффекты косвенного воздействия электромагнитных полей могут проявляться при физическом контакте (например, соприкосновение или расчесывание в обратном направлении) человека с объектом (например, металлическим объектом в электромагнитном поле), обладающим другим электрическим потенциалом. В результате такого контакта возникает перенос электрического заряда (ток прикосновения), который накопился на объекте или на теле человека. При частотах поля до 100 кГц перенос электрического заряда от объекта, находящегося в поле, к телу человека может привести к возбуждению мышечной системы и/или периферической нервной системы. С увеличением силы тока человек начинает ощущать раздражающее действие тока вплоть до болевых ощущений, теряет способность освободиться от действия тока (например, не может разжать руку и отпустить объект). При высокой силе тока возникают трудности с дыханием, а при очень высокой силе тока может наблюдаться фибрилляция сердечных желудочков (Tenforde and Kaune 1987). Значения пороговых уровней для таких эффектов зависят от частоты поля. Наименьшее значение порога характерно для частот от 10 до 100 Гц. Невысокие значения порога для реакции со стороны периферической нервной системы характерны для частот до нескольких кГц. Защита от таких эффектов обеспечивается выполнением инженерного и/или административного контроля или применением индивидуальных средств защиты (спецодежда).

Искровые разряды могут возникать в случае, если человек находится в непосредственной близости к объекту, обладающим другим электрическим потенциалом, даже не соприкасаясь с ним (Tenforde and Kaune 1987; UNEP/WHO/IRPA 1993). В группе электрически изолированных добровольцев, каждый из которых держал кончик пальца близко к заземленному объекту, порог ощущения искрового разряда в 10% случаев составлял 0,6-1,5 кВ м⁻¹. Пороговые значения, вызывающие раздражение в этих условиях воздействия, составляли порядка 2,0-3,5 кВ м⁻¹. При высоком значении силы тока прикосновения могут происходить мышечные сокращения. У мужчин-добровольцев медианное пороговое значение тока прикосновения, при котором они не могли отпустить заряженный проводник, составляло 9 мА при частоте 50/60 Гц, 16 мА при частоте 1 кГц, 50 мА при 10 кГц и порядка 130 мА при частоте 100 кГц (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Пороговые значения силы тока прикосновения для различных эффектов косвенного воздействия электромагнитных полей с частотой до 100 кГц представлены в таблице 2 (UNEP/WHO/IRPA 1993).

Таблица 2. Диапазоны пороговых значений силы тока при косвенном воздействии магнитных и электрических полей для детей, взрослых женщин и мужчин.

Эффект	Пороговое значение силы тока (мА) при частоте поля:		
	50/60 Гц	1 кГц	100 кГц
Ощущение при прикосновении	0,2-0,4	0,4-0,8	25-40
Боль от контакта кончиком пальца	0,9-1,8	1,6-3,3	33-55
Болевой шок/безопасный порог	8-16	12-24	112-224
Тяжелый шок/трудность дыхания	12-23	21-41	160-320

Основные выводы о биологических эффектах и эпидемиологических исследованиях (воздействие полей с частотой до 100 кГц)

На основе результатов лабораторных исследований нет достаточных оснований утверждать о стимулирующем влиянии магнитных полей промышленной частоты на развитие злокачественных опухолей, за возможным исключением рака молочной железы. Несмотря на то, что необходимо проведение дальнейших исследований на лабораторных животных для выяснения возможного влияния ELF полей на сигналы в клетках и механизмы эндокринной регуляции – процессы, которые могут оказывать влияние на развитие рака, стимулируя пролиферацию иницированных клеток – в настоящее время можно сделать вывод об отсутствии убедительных доказательств канцерогенного эффекта этих полей и невозможности использования этих данных для разработки рекомендаций по ограничению воздействия.

В лабораторных исследованиях на клетках и животных не обнаружено эффектов, которые бы указывали на неблагоприятное воздействие низкочастотных полей на здоровье человека при значениях плотности индукционного электрического тока 10 мА м^{-2} и ниже. При более высоких значениях плотности индукционного электрического тока ($10\text{-}100 \text{ мА м}^{-2}$) были получены согласованные результаты о значительных тканевых эффектах, включая функциональные изменения нервной системы (Tenforde 1996).

Данные по риску рака, связанного с воздействием ELF полей, для людей, проживающих в непосредственной близости к линиям электропередач, являются согласованными в отношении незначительно повышенного риска для лейкемии в детском возрасте, однако, современные исследования подвергают сомнению ранее наблюдавшуюся слабую ассоциацию. Тем не менее, результаты последних исследований не указывают на повышенный риск любого другого типа рака у детей и любых других форм у взрослых. Причины гипотетической связи между детской лейкемией и проживанием в непосредственной близости к линиям электропередач неизвестны. Если эта связь не обусловлена воздействием ELF электрических и магнитных полей, создаваемых линиями электропередач, то, вероятно, она обусловлена влиянием неизвестного фактора риска, связанного с ними. Без поддержки лабораторных исследований результаты эпидемиологических исследований являются недостаточными для разработки норм по ограничению воздействия.

В нескольких исследованиях получены данные о повышенном риске определенных типов рака, таких как лейкемия, рак нервной ткани и, в некоторой степени, рак молочной железы у персонала электротехнической промышленности. Во многих исследованиях в качестве оценок воздействия на человека были использованы данные по типу работы на производстве для формирования групп персонала согласно предполагаемым уровням воздействия магнитных полей. В более поздних исследованиях были использованы усовершенствованные методы для оценки воздействия. В целом, результаты этих

исследований свидетельствуют о повышенном риске лейкемии и рака головного мозга, однако, наблюдаются противоречия по другим локализациям рака, для которых риск был повышен. Имеющиеся данные недостаточны для разработки рекомендаций по ограничению воздействия ELF полей. Кроме этого, в эпидемиологических исследованиях не получено согласованных данных о воздействии полей на репродуктивную систему.

Измерения биологического ответа в лабораторных исследованиях и в исследованиях с участием добровольцев указывают на возможное, но незначительное неблагоприятное воздействие ELF полей на уровнях, которым обычно подвергаются люди. На основе данных об эффектах воздействия ELF полей на нервную систему была получена оценка порогового значения плотности тока, составляющая 10 mA m^{-2} для полей с частотой до 1 кГц. Среди добровольцев наиболее согласованным эффектом воздействия являлось визуальное восприятие фосфенов и незначительное уменьшение частоты сердцебиения во время или сразу после воздействия ELF полей. Однако, нет оснований утверждать, что эти кратковременные эффекты связаны с каким-либо долговременным риском для здоровья человека. У некоторых видов грызунов после воздействия слабых ELF электрических и магнитных полей наблюдалось снижение синтеза мелатонина шишковидным телом в ночное время. Однако, в исследованиях среди добровольцев в контролируемых условиях не было обнаружено воздействия магнитных полей с частотой 60 Гц до 20 мкТл на изменение уровня мелатонина в крови.

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ ОГРАНИЧЕНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЛЕЙ (с частотой 100 кГц – 300 ГГц)

В этом разделе приводится обзор научной литературы о биологических эффектах и потенциальных эффектах для здоровья человека при воздействии электромагнитных полей с частотой от 100 кГц до 300 ГГц. Подробные обзоры по этой проблеме приведены в публикациях (NRPB 1991; UNEP/WHO/IRPA 1993; McKinlay et al. 1996; Polk and Postow 1996; Repacholi 1998).

Эффекты прямого воздействия электромагнитных полей

Эпидемиологические исследования. Исследования влияния электромагнитных полей микроволнового диапазона на репродуктивную систему человека и риск рака ограничены. Обзор научной литературы представлен в публикации UNEP/WHO/IRPA (1993).

Влияние на репродуктивную функцию. В двух больших исследованиях, проводившихся среди женщин, которым для уменьшения болей от маточных сокращений во время родов применяли метод микроволновой диатермии, не обнаружено неблагоприятных эффектов для плода (Daels 1973, 1976). Однако, в семи исследованиях исходов беременностей и дефектов развития плода, проведенных среди женщин, подвергавшихся воздействию ЭМП микроволнового диапазона в производственных условиях, получены как положительные, так и отрицательные результаты. В нескольких наиболее многочисленных эпидемиологических исследованиях, проведенных среди женщин-сварщиц пластиков и физиотерапевтов, работающих с оборудованием для коротковолновой диатермии, не обнаружено статистически значимого влияния ЭМП от таких источников на частоту спонтанных аборт и пороков развития у плода (Kallen et al. 1982). Однако, в других исследованиях, проводившихся среди женщин схожих профессий, обнаружен повышенный риск спонтанных аборт и врожденных дефектов (Larsen et al. 1991; Ouellet-Hellstrom and Stewart 1993). В исследовании среди мужчин-операторов радиолокационных установок не было обнаружено ассоциации между воздействием микроволновых полей и риском синдрома Дауна у их потомков (Cohen et al. 1977). В целом, исследования о воздействии полей микроволнового диапазона на состояние репродуктивной системы характеризуются

неудовлетворительными дозиметрическими оценками и, во многих случаях, небольшой численностью изучаемых групп. Несмотря на отрицательные результаты этих исследований, достаточно сложно прийти к заключению о воздействии электромагнитных полей на репродуктивную функцию человека без проведения дополнительных эпидемиологических исследований в группе людей с высокими уровнями воздействия и надежной дозиметрической поддержкой.

Исследования рака. Эпидемиологические исследования риска рака в результате воздействия полей микроволнового диапазона незначительны и, как правило, не сопровождаются количественными оценками воздействия. В двух эпидемиологических исследованиях среди операторов радиолокационных установок авиационной промышленности и вооруженных сил США не обнаружено повышенного риска заболеваемости и смертности от любых причин (Barron and Baraff 1958; Robinette et al. 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993). Подобные результаты были получены в исследовании Lillienfeld et al. (1978), проведенном среди служащих посольства США в Москве, которые подвергались хроническому воздействию полей микроволнового диапазона низкой интенсивности. В работе Selvin et al. (1992) не обнаружен повышенный риск рака у детей, подвергавшихся хроническому воздействию от больших микроволновых передатчиков, расположенных в непосредственной близости к их домам. В нескольких современных исследованиях не обнаружено значительного увеличения частоты рака нервной ткани среди персонала и военнослужащих, подвергшихся воздействию полей микроволновой частоты (Beall et al. 1996; Grayson 1996). Более того, повышенная смертность от всех причин неочевидна среди пользователей мобильных телефонов (Rothman et al. 1996a, b), однако, еще рано ожидать эффектов воздействия излучения от мобильных телефонов на заболеваемость или смертности от рака.

В работе Szmigielski et al. (1988) обнаружен повышенный риск рака среди военнослужащих, однако результаты этого исследования сложны для интерпретации, поскольку данные о количестве исследуемых и уровнях воздействия не приводятся в публикации в явном виде. В последующем исследовании Szmigielski (1996) были обнаружены повышенные показатели для лейкемии и лимфомы среди военнослужащих, подвергшихся воздействию электромагнитных полей, однако уровни воздействия не были оценены надежно. В нескольких исследованиях, проведенных среди населения, проживающего около передатчиков ЭМП, получены результаты, предполагающие увеличение уровня возникновения лейкемии (Hocking et al. 1996; Dolk et al. 1997a, b), однако, они не являются завершенными. В целом, результаты проведенных эпидемиологических исследований предоставляют ограниченную информацию о риске рака в результате воздействия ЭМП.

Лабораторные исследования. В следующих подразделах представлен обзор и оценка исследований биологических эффектов воздействия электромагнитных полей с частотой в диапазоне 100 кГц–300 ГГц, проведенных в лабораторных условиях. Результаты исследований на добровольцах, подвергавшихся воздействию полей в контролируемых условиях, и лабораторные исследования на клетках, тканях и животных рассматриваются отдельно.

Исследования на добровольцах. Исследования Chatterjee et al. (1986) показали, что с увеличением частоты от порядка 100 кГц до 10 МГц основные эффекты воздействия высокоинтенсивных электромагнитных полей смещаются от возбуждения нервной и мышечной систем к нагреванию. Так, при воздействии поля с частотой 100 кГц основным ощущением является покалывание кожи, а при воздействии поля с частотой 10 МГц – ощущение тепла. Таким образом, в этом диапазоне частот основным критерием защиты здоровья человека должно являться предотвращение стимуляции возбудимых тканей и эффектов нагревания. В диапазоне частот от 10 МГц до 300 ГГц основным эффектом поглощения электромагнитной энергии является нагревание тканей. Повышение

температуры на более 1–2 °С может привести к неблагоприятным эффектам для здоровья, таким как тепловое истощение и тепловой удар (ACGIH 1996). Исследования, проведенные в условиях термического стресса, показали, что при повышении температуры тела до уровней близких к физиологическому тепловому стрессу снижается способность к выполнению простых задач (Ramsey and Kwon 1988). У добровольцев возникало ощущение тепла при прохождении высокочастотного тока порядка 100-200 мА через конечности. Расчетное значение SAR для таких условий воздействия, вероятно, не приведет к локальному повышению температуры более, чем на 1°С (Chatterjee et al. 1986; Chen and Gandhi 1988; Hoque and Gandhi 1988), которое предложено в качестве максимально допустимого значения повышения температуры, при которой не возникают неблагоприятные эффекты для здоровья человека (UNEP/WHO/ IRPA 1993). Результаты исследований среди добровольцев, опубликованные в работах Gandhi et al. (1986) для частот воздействующих полей до 50 МГц и Tofani et al. (1995) для частот до 110 МГц (верхний предел радиовещательного FM диапазона), показали, что контролируемые уровни силы тока в конечностях (100 мА) являются обоснованными для предотвращения неблагоприятных эффектов нагревания (Dimbylow 1997).

Было проведено несколько исследований по терморегуляторным ответам среди добровольцев, находящихся в состоянии покоя и подвергающихся воздействию ЭМП в системах магнитно-резонансного изображения (Shellock and Cuges 1987; Magin et al. 1992). В целом, эти исследования показали, что при продолжительности воздействия полей до 30 минут в условиях, при которых значение SAR для всего тела составляет менее 4 Вт кг⁻², происходит повышение температуры тела человека менее, чем на 1°С.

Исследования на клетках и животных. Результаты исследований поведенческих и физиологических изменений у лабораторных животных, включая грызунов, собак и приматов (кроме человека), при тепловом воздействии электромагнитных полей с частотой выше 10 МГц многочисленны. Известно, что термочувствительность и терморегуляция связаны как с гипоталамусом, так и с терморцепторами, расположенными на коже и внутренних органах. Аfferентные сигналы об изменении температуры поступают в центральную нервную систему и модифицируют активность основных систем нейроэндокринного контроля, запуская физиологические и поведенческие реакции, необходимые для поддержания гомеостаза. При воздействии ЭМП полей на лабораторных животных, сопровождавшимся поглощением энергии порядка 4 Вт кг⁻¹, был обнаружен характерный терморегуляторный ответ, при котором температура тела сначала повышается, а затем стабилизируется путем запуска терморегуляторных механизмов (Michaelson 1983). Ранняя фаза терморегуляторного ответа сопровождается увеличением объема крови в результате поступления экстрацеллюлярной жидкости в круг кровообращения и повышения частоты сердечных сокращений и интравентрикулярного кровяного давления. Эти изменения со стороны сердечно-сосудистой системы способствуют переносу тепла на поверхность тела. Длительное воздействие полей микроволнового диапазона на животных на уровнях, приводящих к повышению температуры, в конечном итоге приводит к повреждению терморегуляторных механизмов.

В нескольких исследованиях на грызунах и обезьянах показано присутствие поведенческой компоненты в терморегуляторной реакции организма. Так, при значениях SAR в диапазоне 1-2 Вт кг⁻¹ животные выполняли задачи в меньшем объеме (Stern et al. 1979; Adair and Adams 1980; de Lorge and Ezell 1980; D'Andrea et al. 1986). У обезьян изменения в терморегуляторном поведении наблюдались при повышении температуры в области гипоталамуса на 0,2– 0,3°С (Adair et al. 1984). Гипоталамус является центром управления нормального терморегуляторного процесса, и его активность может изменяться даже при небольших локальных изменениях температуры в условиях, при которых ректальная температура остается постоянной. В исследованиях на клетках и животных регистрировалось большое количество физиологических изменений при таком воздействии

поля, когда поглощение электромагнитной энергии приводило к повышению температуры на 1–2°C (Michaelson and Elson 1996). Эти эффекты включали изменения функций нервной и нервно-мышечной систем, повышение проницаемости гематоэнцефалического барьера, ухудшение зрения (помутнение хрусталика и корнеальные повреждения), связанные со стрессом изменения в иммунной системе, гематологические изменения, изменения в репродуктивной функции (например, сниженная выработка спермы), тератогенные эффекты, а также изменения в морфологии клеток, содержании воды и электролитов, функции клеточных мембран.

В условиях локального воздействия ЭМП может произойти значительное тепловое воздействие на такие чувствительные органы, как глаза и семенники. Воздействие поля в микроволновом диапазоне в течение 2–3 часов привело к возникновению катаракты у кроликов при значениях SAR в диапазоне 100–140 Вт кг⁻¹, что соответствовало повышению температуры в хрусталике глаза до 41–43°C (Guy et al. 1975). У обезьян, подвергавшихся воздействию микроволновых полей той же или более высокой интенсивности, катаракта не была обнаружена, что, вероятно, обусловлено разными механизмами поглощения энергии в глазу у обезьян и кроликов. При очень высоких частотах (10–300 ГГц) поглощение электромагнитной энергии ограничивается областью эпидермального слоя кожи, подкожной тканью и внешними частями глаза. При частотах в верхнем значении частотного диапазона глубина поглощения небольшая. При воздействии полей такой частоты не происходит повреждения глаз, если плотность потока микроволновой энергии не превышает 50 Вт м⁻² (Slaney and Wolbarsht 1980; UNEP/WHO/IRPA 1993).

В последнее время значительный интерес уделяется возможным канцерогенным эффектам воздействия полей микроволнового диапазона с частотой, используемой в системах связи, включая мобильные телефоны и базовые станции сотовой связи. Обзор результатов исследований по этой проблеме опубликован в документе ICNIRP (1996). В целом, на основании результатов многих исследований можно предположить, что поля микроволнового диапазона не обладают мутагенным эффектом и, таким образом, воздействие этих полей, вероятно, не инициирует канцерогенез (NRPB 1992; Cridland 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Однако, в нескольких современных исследованиях высказано предположение, что воздействие микроволновых полей на грызунов при значениях SAR порядка 1 Вт кг⁻¹ может привести к нитевым разрывам ДНК в семенниках и ткани головного мозга (Sarkar et al. 1994; Lai and Singh 1995, 1996). Однако, в публикациях ICNIRP (1996) и Williams (1996) приведены методологические недостатки этих исследований, которые могли значительно повлиять на результаты. У крыс, подвергавшихся воздействию микроволновых полей в продолжительный период времени до 25 месяцев, был обнаружен избыток первичных злокачественных опухолей относительно контроля (Chou et al. 1992). Однако, частота возникновения доброкачественных опухолей между группами не различалась. Кроме того, не наблюдалось преобладания рака определенной локализации в группе облученных крыс по сравнению с контрольной группой, включающей крыс того же рода и той же линии, содержащихся в схожих условиях. В целом, результаты этого исследования не могут быть интерпретированы как свидетельствующие о канцерогенном действии электромагнитных полей микроволнового диапазона.

В нескольких исследованиях изучалось воздействие микроволнового излучения на развитие инициированных раковых клеток. В работе Szmigielski et al. (1982) был показан повышенный рост клеток с трансплантированной саркомой легких у крыс, которые находились под воздействием микроволн с высокой плотностью потока энергии. Вероятно, этот эффект обусловлен снижением иммунной защиты в ответ на тепловой стресс в результате воздействия микроволнового излучения. В современных исследованиях не обнаружено нетеплового влияния микроволнового излучения на развитие меланомы у мышей или глиомы головного мозга у крыс (Santini et al. 1988; Salford et al. 1993).

В работе Repacholi et al. (1997) опубликованы результаты исследования воздействия электромагнитных полей с частотой 900 МГц, импульсом 217 Гц и длительностью импульса 0,6 мс на мышью с трансгеном *Em-pim1*. В результате исследования обнаружено двухкратное увеличение частоты лимфомы в группе из 100 трансгенных самок-мышей по сравнению с группой контроля, состоявшей из 101 особи. Поскольку мыши могли свободно перемещаться в своих клетках, значение SAR характеризовалось большим разбросом (0,01–4,2 Вт кг⁻²). Учитывая, что скорость метаболизма у этих мышей в состоянии покоя составляла 7–15 Вт кг⁻¹, небольшое повышение температуры могло наблюдаться при воздействии полей при значениях SAR в верхнем диапазоне. Вероятно, результаты этого исследования свидетельствуют о нетепловом механизме воздействия, который необходимо исследовать в дальнейшем. Однако, для оценки риска для здоровья человека необходимо прояснить ряд вопросов. Прежде всего, необходимо проведение повторных исследований, в которых будет ограничено перемещение животных, что позволит снизить вариабельность значений SAR и определить возможную дозовую зависимость. Кроме того, необходимо проведение дальнейших исследований на других моделях животных и оценивание возможности применения данных, полученных на трансгенных животных, для человека.

Обзор импульсных и амплитудно-модулированных полей

По сравнению с непрерывным электромагнитным излучением, импульсные микроволновые поля с тем же значением скорости поглощения энергии в тканях в целом обладают более высокой биологической активностью, особенно если для биологического эффекта установлен порог, превышение которого необходимо для его обнаружения (ICNIRP 1996). Известным примером такого эффекта воздействия ЭМП является «слышимость микроволн» (Frey 1961; Frey and Messenger 1973; Lin 1978). Этот эффект заключается в том, что люди с нормальным слухом могут слышать импульсно-модулированные поля с частотой от порядка 200 МГц до 6,5 ГГц. Слуховые ощущения обычно описывались как жужжание, шелканье и тресканье в зависимости от характеристик модуляции поля. Такой эффект объяснялся термоэластическим взаимодействием в слуховых центрах коры головного мозга. Пороговое значение слухового восприятия полей составляет порядка 100–400 мДж м⁻² для импульсов с продолжительностью менее 30 мс и частотой 2,45 ГГц (что соответствует значению SA порядка 4–16 мДж кг⁻¹). Повторное или продолжительное воздействие такого эффекта может оказаться стрессовым и потенциально вредным.

В нескольких публикациях было высказано предположение о том, что сетчатка, радужная оболочка и корнеальный эндотелий глаза приматов являются чувствительными к воздействию импульсного микроволнового излучения (Kues et al. 1985; UNEP/WHO/IRPA 1993). Дегенеративные изменения в светочувствительных клетках сетчатки были обнаружены при значениях поглощенной энергии 26 мДж кг⁻¹. После введения малеат тимолола, применяемого для лечения глаукомы, пороговое значение, при котором воздействие импульсных полей приводит к повреждению сетчатки, снизилось до 2,6 мДж кг⁻¹. Однако, попытка частичного повторения результатов этих исследований в условиях воздействия непрерывного ЭМ излучения (т.е. не импульсных полей) в независимой лаборатории была безуспешной (Kamimura et al. 1994). Таким образом, в настоящее время невозможно оценить потенциальное воздействие микроволновых импульсных полей на здоровье человека на основе данных, полученных в первоначальной работе Kues et al. (1985).

Показано, что воздействие интенсивного импульсного микроволнового поля приводит к угнетению реакции испуга у мышей в состоянии бодрствования и вызывает их перемещение (NRPB 1991; Sienkiewicz et al. 1993; UNEP/WHO/IRPA 1993). Пороговое значение SA в центральной части головного мозга, при котором изменялись поведенческие реакции мышей (перемещение в клетке), составило 200 Дж кг⁻¹ для импульсов

длительностью 10 мкс. Механизм возникновения таких эффектов воздействия импульсного микроволнового излучения до сих пор остается неясным, однако предполагается, что он связан с явлением «слышимости микроволн». Слуховой порог для грызунов на порядок ниже, чем для человека, который составляет [у грызунов] 1–2 мДж кг⁻¹ для импульсов продолжительностью менее 30 мкс. Показано, что воздействие полей с импульсами такой продолжительности влияет на метаболизм нейромедиаторов и концентрацию нервных рецепторов, связанных с реакциями на стресс и раздражение, в различных отделах головного мозга крысы.

Изучение нетеплового воздействия высокочастотных ЭМП основывается на лабораторных исследованиях биологических эффектов воздействия полей с амплитудной модуляцией (АМ) при значениях SAR, при которых не происходит детектируемого нагревания тканей. В исследованиях, проведенных в двух независимых лабораториях, было обнаружено, что очень высокочастотные поля с амплитудной модуляцией с крайне низкой частотой (6–20 Гц) вызывают небольшое, но статистически значимое высвобождение Ca⁺⁺ с поверхности клеток головного мозга у цыплят (Bawin et al. 1975; Blackman et al. 1979). Последующая попытка повторить эти результаты с использованием такого же АМ поля была неудачной (Albert et al. 1987). В нескольких других исследованиях влияния АМ полей на гомеостаз Ca⁺⁺ были получены как положительные, так и отрицательные результаты. Так, например, эффекты воздействия АМ полей на Ca⁺⁺, связывающийся на поверхность клеток, наблюдались на нейробластомных клетках, панкреатических клетках, сердечной ткани, и клетках головного мозга кошек, но не наблюдались в культуре нервных клеток крыс, скелетных мышц цыплят или клеток головного мозга крыс (Postow and Swicord 1996).

Обнаружено, что амплитудно-модулированные поля влияют на электрическую активность головного мозга (Bawin et al. 1974), ингибируют цитотоксическую активность Т-лимфоцитов (Lyle et al. 1983), приводят к снижению активности нециклической АМФ-зависимой киназы в лимфоцитах (Byus et al. 1984) и вызывают кратковременное увеличение активности орнитин декарбоксилазы – энзима, существенного для клеточной пролиферации (Byus et al. 1988; Litovitz et al. 1992). Однако, эти эффекты не наблюдались в других клеточных системах и функциональных точках, включая «кэппинг» лимфоцитов, изменение злокачественных клеток и электрических и энзимных свойств мембран (Postow and Swicord 1996). Особо значимым для потенциальных канцерогенных эффектов импульсных полей является исследование, проведенное Balcer-Kubiczek and Harrison (1991), в котором обнаружено ускорение злокачественных изменений в клетках при воздействии на них 2450-МГц микроволнового излучения с модулированным импульсом 120 Гц. В исследовании наблюдалась зависимость эффектов от напряженности поля, однако, они проявлялись в случае, если в культуре клеток присутствовал ТФА, являющийся химическим стимулятором рака. Результаты этого исследования предполагают, что импульсное микроволновое излучение может проявлять ко-мутагенные эффекты в комбинации с химическим агентом, который увеличивает скорость пролиферации деформированных клеток. Однако, к настоящему времени не было предпринято попыток к проведению повторных исследований, таким образом, применимость этих результатов к оценке эффектов для здоровья человека неясна.

Интерпретация некоторых наблюдаемых биологических эффектов воздействия АМ электромагнитных полей осложнена очевидным наличием так называемых «окон», т.е. возникновением эффектов в небольшом диапазоне значений плотности потока энергии и частоты. К сожалению, к настоящему времени не принято какой-либо модели, позволяющей адекватно объяснить это явление, которое подрывает традиционную концепцию монотонной зависимости между интенсивностью воздействующего поля и тяжестью возникающих биологических эффектов.

В целом, литературные данные о нетепловом воздействии АМ электромагнитных полей очень сложны для анализа, надежность и обоснованность опубликованных выводов об

эффектах неясна, а важность этих эффектов для здоровья человека настолько неопределенна, что невозможно использовать этот набор информации в качестве основы для разработки пределов, ограничивающих воздействие таких полей на человека.

Эффекты косвенного воздействия электромагнитных полей

При прикосновении человека к незаземленному металлическому предмету, заряженному в результате воздействия поля с частотой от 100 кГц до 110 МГц, или при контакте человека, получившего заряд, с заземленным металлическим предметом могут возникнуть электрические разряды или ожоги. Необходимо отметить, что верхняя граница частотного диапазона для тока прикосновения (110 МГц) установлена по причине отсутствия данных об эффектах воздействия полей более высокой частоты, а не отсутствия эффектов. Однако, 110 МГц является максимальным значением FM радиовещательного диапазона частот. Пороговые значения токов прикосновения, при которых наблюдаются биологические эффекты различной тяжести, от ощущения токов до болевых реакций, измерялись в контролируемых условиях среди добровольцев (Chatterjee et al. 1986; Tenforde and Kaune 1987; Bernhardt 1988) и обобщены в таблице 3. В целом было показано, что пороговое значение силы тока прикосновения, при котором ощущалось действие тока и чувствовалась боль, незначительно изменяется для частотного диапазона полей 100 кГц–1 МГц и, возможно, не будет значительно изменяться в диапазоне частот до 110 МГц. Как указывалось ранее для низкочастотных полей, наблюдается значительная индивидуальная вариабельность в чувствительности к току у мужчин, женщин и детей. Такие же закономерности характерны и для высокочастотных полей. Данные в таблице 3 показывают диапазоны медианных значений для людей различного роста и различной чувствительности к току прикосновения.

Таблица 3. Диапазоны пороговых значений силы тока при косвенном воздействии ЭМП на детей, мужчин и женщин

Эффект	Пороговое значение силы тока (мА) при частоте поля:	
	100 кГц	1 МГц
Ощущение при прикосновении	25-40	25-40
Боль от контакта кончиком пальца	33-55	28-50
Болевой шок/безопасный порог	112-224	Не определен
Тяжелый шок/трудность дыхания	160-320	Не определен

Основные выводы о биологических эффектах и эпидемиологических исследованиях (воздействие полей с частотой от 100 кГц до 300 ГГц)

Имеющиеся результаты экспериментальных исследований показали, что воздействие ЭМП на человека, находящегося в состоянии покоя, в течение 30 минут при значениях SAR для всего тела от 1 до 4 Вт кг⁻¹ приводит к повышению температуры тела менее, чем на 1°C. Данные, полученные в опытах на лабораторных животных, свидетельствуют о существовании порога для поведенческих реакций в этом же диапазоне значений SAR. Воздействие более интенсивных полей, при которых значение SAR превышает 4 Вт кг⁻¹, может привести к угнетению терморегуляторных возможностей организма и к нагреванию тканей до опасного уровня. Результаты многочисленных исследований на грызунах и приматах (кроме человека) свидетельствовали о различных эффектах повреждения тканей в результате повышения температуры всего тела или отдельных частей на 1–2°C. Чувствительность различных тканей к тепловому повреждению изменялась значительно, однако, пороговое значение для возникновения необратимых эффектов в наиболее

чувствительных тканях превышало 4 Вт кг^{-1} в нормальных условиях окружающей среды. Эти данные формируют основу для установления порогового значения SAR, ограничивающего воздействие высокочастотных полей в производственных условиях, равного $0,4 \text{ Вт кг}^{-1}$. Это значение характеризуется большим коэффициентом запаса, учитывающим другие лимитирующие условия, как, например, высокие значения температуры внешней среды, влажности или уровня физической активности.

Результаты лабораторных исследований и ограниченные данные по человеку (Michaelson and Elson 1996) указывают на то, что в термически стрессовой среде или при употреблении наркотиков или алкоголя, терморегуляторные возможности организма могут быть подорваны. В этих условиях, необходимо дополнительно ввести коэффициент запаса для обеспечения адекватной защиты населения.

Данные по воздействию высокочастотных ЭМП на человека, которое может привести к регистрируемому нагреванию тканей тела, были получены в контролируемых условиях воздействия среди добровольцев и в эпидемиологических исследованиях персонала, подвергавшегося воздействию от таких источников ЭМП как радары, медицинское оборудование для диатермии, машины для термосварки. Эти результаты полностью поддерживают выводы, полученные в лабораторных исследованиях, о том, что неблагоприятные эффекты для здоровья человека могут возникать при повышении температуры тела более, чем на 1°C . В эпидемиологических исследованиях, проведенных в группах персонала и населения, не было обнаружено неблагоприятного воздействия типичных для среды обитания электромагнитных полей на здоровье человека. Несмотря на недостатки эпидемиологических исследований, таких как ненадежные дозиметрические оценки и др., они не предоставили убедительных доказательств неблагоприятного воздействия типичных уровней ЭМП на репродуктивную систему или их связи с повышенным риском рака. Эти выводы согласуются с результатами лабораторных исследований в моделях на клетках и животных, которые не свидетельствовали ни о тератогенных, ни о канцерогенных эффектах воздействия высокочастотных ЭМП на уровнях, не приводящих к тепловому нагреванию тканей.

Воздействие импульсных электромагнитных полей достаточной интенсивности приводит к определенным прогнозируемым эффектам, таким как явление слышимости микроволн и изменение поведенческих реакций. В эпидемиологических исследованиях, проведенных среди персонала и населения, подвергавшихся воздействию, не обнаружено эффектов для здоровья человека. Исследования, свидетельствующие о тяжелых повреждениях сетчатки глаза, не могут считаться надежными, т.к. эти результаты не были воспроизведены в повторных исследованиях.

В многочисленных исследованиях биологических эффектов воздействия амплитудно-модулированных ЭМП, в основном выполнявшихся при воздействии низких уровней излучения, были получены как положительные, так и отрицательные результаты. Тщательный анализ этих исследований показывает, что эффекты воздействия АМ полей сильно зависят от параметров облучения, типов клеток и тканей и исследуемых биологических мишеней. В целом, нетепловое воздействие амплитудно-модулированных электромагнитных полей на биологические системы является незначительным, поэтому его очень сложно соотнести с потенциальными эффектами для здоровья человека. Нет убедительных доказательств существования «окон», т.е. проявления эффектов в определенных диапазонах значений плотности потока энергии и частоты.

Электротравмы и возникновение ожогов рассматриваются как неблагоприятные эффекты косвенного воздействия высокочастотных ЭМП в результате контакта человека с металлическим предметом в поле. При частотах поля порядка $100 \text{ кГц} - 110 \text{ МГц}$ (верхний предел FM радиовещательного диапазона) пороговые значения тока прикосновения, при которых наблюдаются эффекты, связанные с ощущением тока или чувством боли от тока,

незначительно зависят от частоты поля. Пороговые значения, при которых может ощущаться воздействие поля, изменяются от 25 до 40 мА для людей различного роста. Пороговые значения, при которых возникает чувство боли, изменяются в диапазоне от порядка 30 до 55 мА. При значениях силы тока прикосновения выше 50 мА могут возникать сильные ожоги в месте контакта ткани с металлическим проводником в электромагнитном поле.

РУКОВОДСТВА ПО ОГРАНИЧЕНИЮ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Ограничение воздействия электромагнитных полей в производственных условиях и на население

Воздействие в производственных условиях связано с облучением взрослых людей, которые осознают, что они работают в условиях воздействия ЭМП. Они знают о последствиях такого воздействия, потенциальном риске и принимают соответствующие меры предосторожности. Население состоит из людей различного возраста и состояния здоровья, которые, во многих случаях, не знают о воздействии ЭМП. Более того, население не способно принимать меры по предупреждению или ограничению воздействия. Поэтому с учетом этих факторов для населения принимаются более жесткие ограничения воздействия ЭМП.

Основные ограничения и контролируемые уровни

Ограничения воздействия электромагнитных полей устанавливаются на основе научно доказанных медицинских эффектов и называются основными ограничениями. В зависимости от частоты электромагнитного поля для определения основных ограничений используются различные физические величины, такие как плотность электрического тока, SAR и плотность потока энергии. Защита от неблагоприятных эффектов для здоровья человека будет обеспечена в случае соблюдения основных ограничений. Измерение параметров, характеризующих основные ограничения, является сложным, поэтому для практической оценки воздействия ЭМП и проведения санитарно-гигиенического мониторинга вводятся контролируемые уровни. Таким образом, на практике производят простое сравнение измеренных значений физических величин с контролируемыми уровнями. Соответствие со всеми контролируемыми уровнями, приведенными в этом документе, гарантирует соответствие с основными ограничениями. Если измеренное или расчетное значение превышает значение контролируемого уровня, это не означает, что основное ограничение будет превышено, однако в этом случае необходимо провести более детальный анализ с целью оценки соответствия с основными ограничениями.

Основные допущения по коэффициентам гигиенического запаса

В настоящее время на основе информации об эффектах воздействия ЭМП на человека и экспериментальных животных невозможно надежно оценить значения коэффициентов запаса для всего частотного диапазона электромагнитного излучения и всех частотных модуляций. Кроме того, неопределенность значений коэффициентов запаса обусловлена неопределенностью дозиметрических оценок при оценке эффектов (Repacholi 1998). При оценке коэффициентов запаса для высокочастотных полей были учтены следующие факторы:

- Эффекты воздействия ЭМП в неблагоприятных условиях окружающей среды (высокая температура и т.д.) и/или при высокой физической активности; и

- Потенциально высокая чувствительность к теплу определенных групп населения, например, слабых и/или пожилых людей, новорожденных, детей, людей с заболеваниями или принимающих медицинские препараты, которые влияют на термочувствительность.

При оценке контролируемых уровней для высокочастотных полей были учтены следующие дополнительные факторы:

- Различия в поглощении электромагнитной энергии у людей различного размера и различной ориентации относительно поля; и
- Отражение, фокусировка и рассеяние падающего поля, приводящие к повышенному локальному поглощению энергии высокочастотного поля.

ОСНОВНЫЕ ОГРАНИЧЕНИЯ

Для оценки основных ограничений для электромагнитных полей различной частоты были использованы различные научные основы:

- Для полей с частотой от 1 Гц до 10 МГц основные ограничения приведены по плотности электрического тока с целью предупреждения воздействия на функционирование нервной системы;
- Для полей с частотой от 100 кГц до 10 ГГц основные ограничения приведены по SAR для предупреждения теплового стресса всего тела человека или повышенного локального нагревания тканей;
- Для полей с частотой в диапазоне от 100 кГц до 10 МГц основные ограничения приведены по плотности электрического тока и SAR;
- Для полей с частотой от 10 до 300 ГГц основные ограничения приведены по плотности потока энергии с целью предупреждения повышенного нагревания в ткани на (или у) поверхности тела.

При воздействии полей с частотой в диапазоне от нескольких Гц до 1 кГц и значениях плотности индукционного тока выше 100 mA m^{-2} превышает порог возбудимости центральной нервной системы и других острых эффектов, как например, изменение визуально вызванного потенциала. Таким образом, для обеспечения безопасности в производственных условиях уровни воздействия полей с частотой в диапазоне от 4 Гц до 1 кГц должны быть ограничены до такого воздействия, при котором плотность индукционного тока будет ниже 10 mA m^{-2} , т.е. для оценки основных ограничений для производственных условий воздействия используется коэффициент запаса, равный 10. Для населения применяется более жесткое ограничение [с коэффициентом запаса, равным 50], таким образом, основное ограничение для населения составляет 2 mA m^{-2} . При воздействии полей с частотой ниже 4 Гц и выше 1 кГц порог для возбудимости нервной системы увеличивается, поэтому для этого диапазона частот значительно повышается основное ограничение по плотности индукционного тока.

Научно доказанные биологические и медицинские эффекты при воздействии полей с частотой от 10 МГц до нескольких ГГц согласуются с реакциями, характерными при повышении температуры тела более, чем на 1°C . Такое повышение температуры характерно для воздействия электромагнитных полей при значениях SAR для всего тела человека порядка 4 Wt kg^{-1} в течение 30 минут в умеренных условиях окружающей среды. Таким образом, для обеспечения адекватной защиты в производственных условиях в качестве основного ограничения установлено среднее для всего тела человека значение SAR, составляющее $0,4 \text{ Wt kg}^{-1}$. Для населения введен дополнительный коэффициент запаса, равный 5, таким образом, среднее значение SAR составляет $0,08 \text{ Wt kg}^{-1}$. Для населения

принимаются более жесткие основные ограничения воздействия электромагнитных полей, которые учитывают различия в возрасте и состоянии здоровья.

В настоящее время информация о влиянии переходных токов на здоровье человека для низкочастотных полей ограничена. Таким образом, МКЗНИ рекомендует, что ограничения для плотности тока, индуцированного переходными полями или полями с очень узкими временными пиками, должны рассматриваться как мгновенные величины, которые не следует усреднять по времени. Основные ограничения для плотности тока, среднего для всего тела значения SAR и локальных значений SAR при воздействии ЭМП с частотой в диапазоне от 1 Гц до 10 ГГц приведены в таблице 4, а основные ограничения для плотности потока энергии ЭМП с частотой от 10 до 300 ГГц представлены в таблице 5.

Таблица 4. Основные ограничения для переменных электрических и магнитных полей с частотой до 10 ГГц.^a

Характеристики воздействия	Частотный диапазон	Плотность тока для головы и туловища (мА м ⁻²) (эффект.)	SAR, среднее значение для тела человека (Вт кг ⁻¹)	SAR, локальное значение (голова и туловище) (Вт кг ⁻¹)	SAR, локальное значение (конечности) (Вт кг ⁻¹)
Воздействие в производственных условиях	До 1 Гц	40	–	–	–
	1-4 Гц	40/ <i>f</i>	–	–	–
	4 Гц – 1 кГц	10	–	–	–
	1 – 100 кГц	<i>f</i> /100	–	–	–
	100 кГц – 10 МГц	<i>f</i> /100	0,4	10	20
	10 МГц – 10 ГГц	–	0,4	10	20
Воздействие на население	До 1 Гц	8	–	–	–
	1-4 Гц	8/ <i>f</i>	–	–	–
	4 Гц – 1 кГц	2	–	–	–
	1 – 100 кГц	<i>f</i> /500	–	–	–
	100 кГц – 10 МГц	<i>f</i> /500	0,08	2	4
	10 МГц – 10 ГГц	–	0,08	2	4

^a примечания:

1. *f* – частота в герцах.
2. По причине неоднородности электрических свойств тела, значение плотностей тока следует усреднять в поперечном сечении площадью 1 см² перпендикулярном направлению тока.
3. Для частот до 100 кГц амплитудное значение плотностей тока может быть получено путем умножения эффект. значения на $\sqrt{2}$ (~1,41). Для импульсов продолжительностью t_p эквивалентное значение частоты, к которой применяется основное ограничение, рассчитывается согласно выражению $f = 1/(2t_p)$.
4. Для частот до 100 кГц и импульсных магнитных полей максимальное значение плотности тока, связанное с импульсами, может быть рассчитано из соотношения время подъема/время падения и максимальной скорости изменения плотности магнитного потока. Таким образом, значение плотности индукционного тока может быть сопоставлено с соответствующим значением основного ограничения.
5. Все значения SAR необходимо усреднить по любому 6-мин. периоду времени.
6. Локальное значение SAR усредняется по любому (непрерывному) участку ткани массой 10 г; для оценки воздействия должно служить максимальное значение SAR, полученное таким образом.
7. Для импульсов продолжительностью t_p эквивалентное значение частоты, к которой применяется основное ограничение, следует рассчитывать согласно выражению $f = 1/(2t_p)$. Кроме того, при воздействии импульсных полей в диапазоне частот от 0,3 до 10 ГГц и при локальном воздействии на голову рекомендуется дополнительное основное ограничение с целью защиты или предотвращения эффектов обусловленных термоупругим расширением. В таком случае, значение SA, усредненное по ткани массой 10 г, не должно превышать 10 мДж кг⁻¹ в производственных условиях воздействия и 2 мДж кг⁻¹ для населения.

Таблица 5. Основные ограничения по плотности потока энергии для частотного диапазона полей от 10 до 300 ГГц.^a

Характеристики воздействия	Плотность потока энергии (Вт м ⁻²)
Воздействие в производственных условиях	50
Воздействие на население	10

^a примечания:

1. Значения плотности потока энергии следует усреднять по любому облучаемому участку площадью 20 см² и любому $68/f^{0.5}$ -мин. периоду времени (где f – частота в герцах), учитывающему эффект существенного снижения глубины проникновения излучения с увеличением частоты.
2. Пространственное максимальное значение плотности потока энергии, усредненное по участку 1 см², не должно превышать указанных значений до 20 раз.

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ УРОВНИ

В некоторых случаях контролируемые уровни оцениваются на основе основных ограничений путем математического моделирования или экстраполяции результатов лабораторных исследований, полученных при воздействии полей определенной частоты. Они приводятся для условий максимального воздействия полей на человека, обеспечивая, таким образом, максимальную защиту. В таблицах 6 и 7 сведены данные по контролируемым уровням в производственных условиях воздействия и в условиях воздействия на население соответственно. Значения контролируемых уровней также приведены на рис.1 и 2. Эти значения представляют собой пространственно усредненные значения для всего тела человека, однако важно отметить, что при таких значениях контролируемых уровней основное ограничение при локальном воздействии также не превышает.

Для низкочастотных полей разработано несколько вычислительных и инструментальных методов, позволяющих на основе основных ограничений оценить значения контролируемых уровней напряженности поля. Упрощения, принятые в расчетах, не учитывают неоднородность распределения и анизотропию электропроводности и других характеристик тканей, имеющих принципиальное значение.

Зависимость значений контролируемых уровней от частоты поля согласуется с данными о биологических эффектах и механизмах взаимодействия полей.

В моделях для магнитного поля предполагается, что электропроводность тела (составляющих его биологических тканей) характеризуется однородностью и изотропностью, и для оценки индукционных токов в различных органах и участках тела используются упрощенные модели кругового проводящего контура. Например, в модели для головы используется следующее выражение для синусоидального поля с частотой f , полученное из закона индукции Фарадея:

$$J = \pi R f \sigma B, \quad (4)$$

где B – плотность магнитного потока и R – радиус контура, в котором индуцируется ток. В более сложных моделях для описания туловища или всего тела человека используются эллипсоидные модели, которые позволяют оценить плотность индукционного тока на поверхности тела (Reilly 1989, 1992).

Таблица 6. Контролируемые уровни воздействия переменных электрических и магнитных полей в производственных условиях (приведены эффективные значения для неискаженных полей).^a

Диапазон частот	Напряженность электрического поля, E (В м ⁻¹)	Напряженность магнитного поля, H (А м ⁻¹)	Магнитное поле, В (мкТл)	Плотность потока энергии эквивалентной плоской волны, S _{eq} (Вт м ⁻²)
До 1 Гц	–	$1,63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	–
1-8 Гц	20000	$1,63 \cdot 10^5 / f^2$	$2 \cdot 10^5 / f^2$	–
8-25 Гц	20000	$2 \cdot 10^4 / f$	$2,5 \cdot 10^4 / f$	–
0,025-0,82 кГц	$500 / f$	$20 / f$	$25 / f$	–
0,82-65 кГц	610	24,4	30,7	–
0,065-1 МГц	610	$1,6 / f$	$2,0 / f$	–
1-10 МГц	$610 / f$	$1,6 / f$	$2,0 / f$	–
10-400 МГц	61	0,16	0,2	10
400-2000 МГц	$3f^{1/2}$	$0,008f^{1/2}$	$0,01f^{1/2}$	$f/40$
2-300 ГГц	137	0,36	0,45	50

^a Примечания:

- f принимает значения, указанные в колонке с диапазонами частот
- Измеренные значения напряженности электрического и магнитного поля могут превышать значения контролируемых уровней, указанные в таблице, в случае, если соблюдаются основные ограничения и не допускается возникновение неблагоприятных эффектов косвенного воздействия.
- Для диапазона частот от 100 кГц до 10 ГГц значения S_{eq}, E², H² и B² необходимо усреднять по любому 6-мин. периоду времени.
- Для амплитудных значений при частотах до 100 кГц см. таблицу 4, примечание 3.
- Для амплитудных значений при частотах, превышающих 100 кГц, см. рис. 1 и 2. Для частотного диапазона от 100 кГц до 10 МГц амплитудные значения напряженности полей получаются интерполяцией 1,5-кратных значений при 100 кГц и 32-кратных значений при 10 МГц. Для частот, превышающих 10 МГц, предполагается, что амплитудное значение плотности энергии эквивалентной плоской волны, усредненное по ширине импульса, не превышает в 1000 раз ограничения по S_{eq}, либо напряженность поля не превышает в 32 раза соответствующие контролируемые уровни, указанные в таблице.
- Для частот, превышающих 10 ГГц, значения S_{eq}, E², H² и B² необходимо усреднять по любому $68/f^{1,05}$ -мин. периоду времени (где f – частота в герцах).
- Для частот ниже 1 Гц значения напряженности электрического поля не приводятся, при таких частотах они могут рассматриваться как постоянные электрические поля. Защита от поражений электрическим током от источников с низким сопротивлением обеспечивается выполнением установленных правил по электробезопасности для такого оборудования.

Таблица 7. Контролируемые уровни воздействия переменных электрических и магнитных полей для населения (приведены эффективные значения для неискаженных полей).^a

Диапазон частот	Напряженность электрического поля, E (В м^{-1})	Напряженность магнитного поля, H (А м^{-1})	Магнитное поле, B (мкТл)	Плотность потока энергии эквивалентной плоской волны, S_{eq} (Вт м^{-2})
До 1 Гц	–	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$	–
1-8 Гц	10000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	–
8-25 Гц	10000	$4000/f$	$5000/f$	–
0,025-0,8 кГц	$250/f$	$4/f$	$5/f$	–
0,8-3 кГц	$250/f$	5	6,25	–
3-150 кГц	87	5	6,25	–
0,15-1 МГц	87	$0,73/f$	$0,92/f$	–
1-10 МГц	$87/f^{1/2}$	$0,73/f$	$0,92/f$	–
10-400 МГц	28	0,073	0,092	2
400-2000 МГц	$1,375f^{1/2}$	$0,0037f^{1/2}$	$0,0046f^{1/2}$	$f/200$
2-300 ГГц	61	0,16	0,20	10

^a Примечания:

1. f принимает значения, указанные в колонке с диапазонами частот
2. Измеренные значения напряженности электрического и магнитного поля могут превышать значения контролируемых уровней, указанные в таблице, в случае, если соблюдаются основные ограничения и не допускается возникновение неблагоприятных эффектов косвенного воздействия.
3. Для диапазона частот от 100 кГц до 10 ГГц значения S_{eq} , E^2 , H^2 и B^2 необходимо усреднять по любому 6-мин. периоду времени.
4. Для амплитудных значений при частотах до 100 кГц см. таблицу 4, примечание 3.
5. Для амплитудных значений при частотах, превышающих 100 кГц, см. рис. 1 и 2. Для частотного диапазона от 100 кГц до 10 МГц амплитудные значения напряженности полей получаются интерполяцией 1,5-кратных значений при 100 кГц и 32-кратных значений при 10 МГц. Для частот, превышающих 10 МГц, предполагается, что амплитудное значение плотности энергии эквивалентной плоской волны, усредненное по ширине импульса, не превышает в 1000 раз ограничения по S_{eq} или напряженность поля не превышает в 32 раза соответствующие контролируемые уровни, указанные в таблице.
6. Для частот, превышающих 10 ГГц, значения S_{eq} , E^2 , H^2 и B^2 необходимо усреднять по любому $68/f^{1,05}$ -мин. периоду времени (где f – частота в герцах).
7. Для частот ниже 1 Гц значения напряженности электрического поля не приводятся; при таких частотах они могут рассматриваться как постоянные электрические поля, ощущение поверхностного электрического заряда не происходит при напряженности поля меньше 25 кВ м^{-1} . Следует остерегаться искровых электрических разрядов, которые могут вызвать раздражение или привести к стрессу.

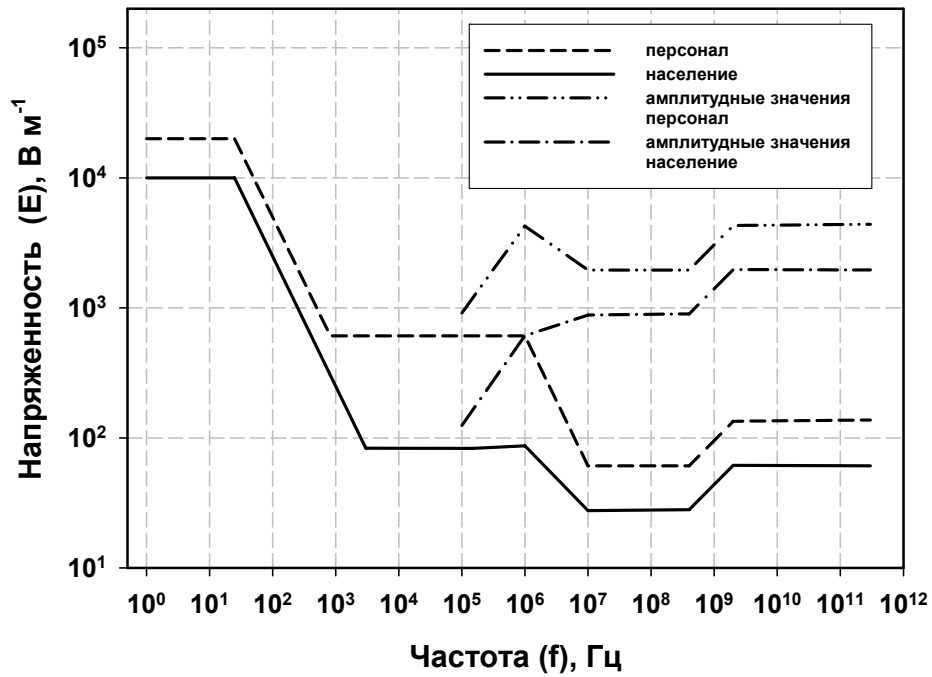


Рис. 1. Контролируемые уровни воздействия переменных электрических полей в производственных условиях и для населения (сравните с таблицами 6 и 7).

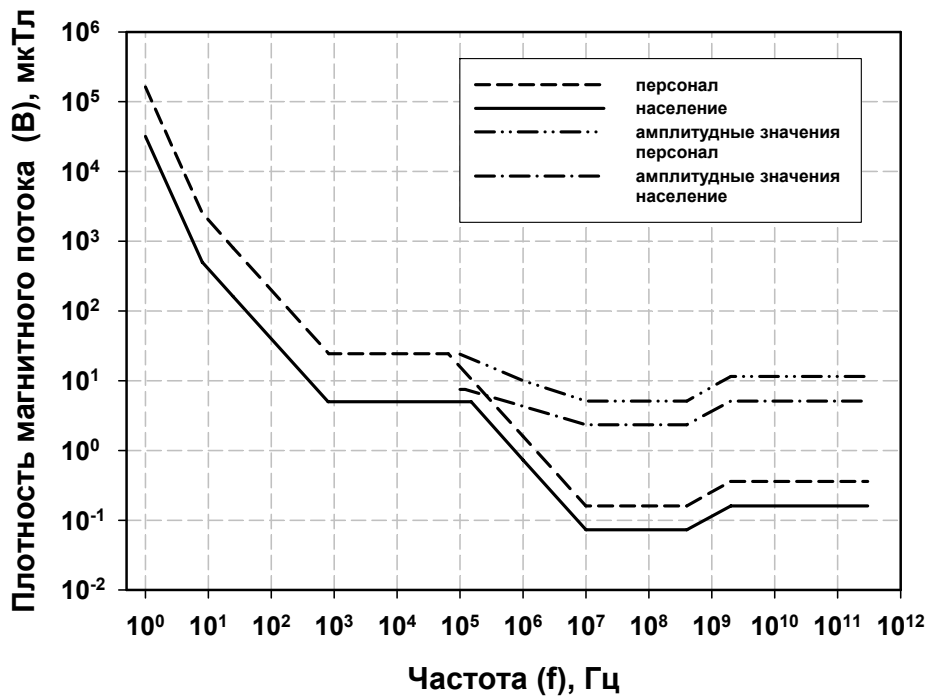


Рис. 2. Контролируемые уровни воздействия переменных магнитных полей в производственных условиях и для населения (сравните с таблицами 6 и 7).

Если для простоты предположить, что значение электропроводности постоянно и составляет $0,2 \text{ См м}^{-1}$, то при воздействии 50-Гц магнитного поля с плотностью магнитного потока 100 мкТл на поверхности тела индуцируется ток с плотностью от $0,2$ до 2 мА м^{-2} (CRP 1997). Согласно NAS (1996), воздействие 60-Гц поля с плотностью магнитного потока 100 мкТл соответствует среднему значению плотности электрического тока $0,28 \text{ мА м}^{-2}$ и максимальному значению порядка 2 мА м^{-2} . Более реальные расчеты с использованием усовершенствованных моделей, в которых уточнены анатомические и электрические характеристики тела (Xi and Stuchly 1994), показывают, что максимальное значение плотности тока превышает 2 мА м^{-2} для 100 мкТл-поля при частоте 60 Гц. Однако, присутствие биологических клеток влияет на пространственное распределение индукционных токов и полей, что приводит к существенным различиям как в величине (выше в два раза), так и в направлении индукционного тока по сравнению с таковыми, полученными с использованием упрощенных моделей (Stuchly and Xi 1994).

В моделях для электрических полей должен быть учтен тот факт, что плотность поверхностного заряда существенно зависит от размеров, сложения и расположения тела в поле, что приводит к переменному и неравномерному распределению токов в теле человека. Для синусоидальных электрических полей с частотой ниже 10 МГц величина плотности индукционного электрического тока в теле человека увеличивается с увеличением частоты. Распределение плотности индукционного тока изменяется обратно пропорционально площади поперечного сечения тела и может достигать относительно высоких значений в шее и щиколотках. Уровни воздействия для населения 5 кВ м^{-1} соответствуют, в наихудших условиях воздействия, плотности индукционного тока порядка 2 мА м^{-2} в шее и туловище, если вектор напряженности электрического поля направлен параллельно оси тела (ILO 1994; CRP 1997). Однако, в реальных наихудших условиях воздействия плотность тока будет соответствовать основному ограничению.

Чтобы проверить соответствие с основными ограничениями, контролируемые уровни для электрических и магнитных полей должны рассматриваться отдельно, а не аддитивно. Это связано с тем, что токи, индуцируемые электрическим и магнитным полем не аддитивны.

В определенных случаях контролируемые уровни для электрических полей с частотой до 100 кГц на рабочем месте могут быть увеличены в два раза, если исключено неблагоприятное воздействие на здоровье человека в результате контакта с заряженным проводником.

При частотах выше 10 МГц контролируемые уровни напряженности электрического и магнитного поля были получены из основных ограничений по среднему значению SAR для тела человека с использованием расчетных методов и экспериментальных данных. В наихудшем случае, поглощение энергии достигает максимального значения в частотном диапазоне от 20 МГц до нескольких сотен МГц. В этом диапазоне значения контролируемых уровней минимальны. Значения напряженности магнитного поля были рассчитаны на основе значений напряженности электрического поля с использованием соотношения между E и H в дальней зоне ($E/H = 377 \text{ Ом}$). В ближней зоне зависимость SAR от частоты не сохраняется, более того, вклад электрической и магнитной компонент должен рассматриваться отдельно. Для консервативной оценки уровней воздействия полей для ближней зоны используются оценки, полученные для дальней зоны, т.к. вклад энергий электрической и магнитной компонент не может превысить ограничений по SAR. Для менее консервативной оценки следует использовать основные ограничения по среднему значению SAR для всего тела или по локальным значениям SAR.

Контролируемые уровни для населения были получены на основе установленных уровней для условий профессионального облучения с использованием различных коэффициентов гигиенического запаса для всего частотного диапазона. Значения

коэффициентов запаса были получены на основе эффектов, которые являются специфичными для различных частотных диапазонов. В целом, коэффициенты запаса соответствуют основным ограничениям, и их значения представляют собой математические соотношения между значениями основных ограничений и полученных уровней:

- В частотном диапазоне до 1 кГц контролируемые уровни воздействия электрических полей для населения в два раза ниже, чем значения, установленные для персонала. Значение 10 кВ м^{-1} для 50 Гц или $8,3 \text{ кВ м}^{-1}$ для 60 Гц, установленное для ограничения воздействия в производственных условиях, включает достаточный запас для предупреждения эффектов возбудимости от токов прикосновения при всех возможных условиях. В качестве контролируемых уровней для населения приняты величины меньше в два раза, т.е. 5 кВ м^{-1} для 50 Гц или $4,2 \text{ кВ м}^{-1}$ для 60 Гц с целью предотвращения неблагоприятных эффектов косвенного воздействия для более 90% населения;
- В низкочастотном диапазоне до 100 кГц контролируемые уровни воздействия магнитных полей для населения в 5 раз ниже таковых, установленных для ограничения воздействия в производственных условиях;
- В частотном диапазоне от 100 кГц до 10 МГц контролируемые уровни воздействия магнитных полей для населения выше по сравнению с пределами, рекомендованными IRPA в 1988 году (IRPA, 1988). В нормативах IRPA контролируемые уровни для напряженности магнитного поля были рассчитаны на основе контролируемых уровней для напряженности электрического поля с использованием соотношения между E и H для дальней зоны. Значения контролируемых уровней являлись консервативными, т.к. вклад магнитного поля с частотой ниже 10 МГц в риск возникновения травм, ожогов или эффектов поверхностного заряда, которые являются основой для ограничения воздействия электрических полей этого же частотного диапазона в производственных условиях, является незначительным;
- В высокочастотном диапазоне от 10 МГц до 10 ГГц контролируемые уровни воздействия электрических и магнитных полей для населения в 2,2 раза ниже уровней, установленных для ограничения воздействия в производственных условиях. Коэффициент 2,2 соответствует квадратному корню из 5, который является коэффициентом запаса для оценки основных ограничений для населения на основе значений, принятых для персонала. Квадратный корень используется для связи величин «напряженность поля» и «плотность потока энергии»;
- В высокочастотном диапазоне от 10 до 300 ГГц контролируемые уровни для населения определяют по значению плотности потока энергии и, как для основных ограничений, они в 5 раз ниже, чем соответствующие контролируемые уровни для ограничения воздействия в производственных условиях;
- Несмотря на то, что информации о связи между биологическими эффектами и максимальными значениями импульсных полей недостаточно, предполагается, что для частот, превышающих 10 МГц, S_{eq} , усредненная по ширине импульса, не должна в 1000 раз превышать значения контролируемых уровней. Альтернативно, напряженность поля не должна превышать соответствующие контролируемые уровни, приведенные в таблицах 6 и 7 или на рис. 1 и 2, в 32 раза. Для частотного диапазона от 0,3 ГГц до нескольких ГГц и при локальном воздействии на голову необходимо вводить ограничения для удельной поглощенной энергии от импульсов с целью предотвращения или ограничения слуховых эффектов, вызванных термоупругим расширением. В этом частотном диапазоне пороговое значение SA, превышение которого приводит к появлению такого эффекта, составляет 4–16 мДж кг⁻¹, что соответствует амплитудным значениям SAR порядка

130-520 Вт кг⁻¹ в головном мозге для импульсов продолжительностью 30 мкс. В частотном диапазоне от 100 кГц до 10 МГц амплитудные значения напряженности полей, показанные на рис. 1 и 2, получены путем интерполяции 1,5-кратного значения при 100 кГц и 32-кратного значения при 10 МГц;

- В таблицах 6 и 7 и на рис. 1 и 2 наблюдается одинаковая динамика зависимости контролируемых уровней от частоты поля, однако «переломы» в кривых наблюдаются при различных значениях частот для персонала и населения. Это связано с тем, что значения коэффициентов запаса должны быть постоянными при сохранении одинаковой частотной зависимости при воздействии полей в производственных условиях и на население.

КОНТРОЛИРУЕМЫЕ УРОВНИ ДЛЯ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА И ТОКА ПРИКОСНОВЕНИЯ

Контролируемые уровни для токов прикосновения в диапазоне частот ЭМП до 100 МГц, который включает FM-диапазон радиовещания, соблюдение которых предотвращает возникновение электротравм и ожогов, приведены ранее. Данные по контролируемым уровням для токов прикосновения представлены в таблице 8.

Таблица 8. Контролируемые уровни для переменных токов, возникающих при соприкосновении с проводниками. ^a

Характеристики воздействия	Диапазон частот	Максимальное значение тока прикосновения (мА)
Воздействие в производственных условиях	До 2,5 кГц	1,0
	2,5-100 кГц	0,4 <i>f</i>
	100 кГц – 110 МГц	40
Воздействие на население	До 2,5 кГц	0,5
	2,5-100 кГц	0,2
	100 кГц – 110 МГц	20 <i>f</i>

^a *f* – частота в кГц.

Учитывая тот факт, что пороговые значения токов прикосновения, вызывающих биологический ответ, для детей и взрослых женщин составляют 1/2 и 2/3 значений для взрослых мужчин, соответствующие значения для населения в 2 раза ниже значений, установленных для ограничения воздействия в производственных условиях. Для частотного диапазона 10–110 МГц контролируемые уровни приводятся по току прикосновения в конечностях, которые ниже основных ограничений по локальному значению SAR (см. таблицу 9).

Таблица 9. Контролируемые уровни индукционных токов в конечностях при воздействии электромагнитных полей с частотой от 10 до 110 МГц. ^a

Характеристики воздействия	Сила тока (мА)
Воздействие в производственных условиях	100
Воздействие на население	45

^a примечания:

1. Контролируемые уровни для населения установлены на основе значений для персонала с коэффициентом запаса, равным $\sqrt{5}$.
2. Для соответствия с основным ограничением по локальному SAR, в качестве основы для контролируемых уровней используется величина, соответствующая квадратному корню из усредненного по любому 6-мин. периоду времени квадратного значения силы индукционного тока.

КОМБИНИРОВАННОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОЛЕЙ РАЗНЫХ ЧАСТОТ

При нормировании одновременного воздействия электромагнитных полей с разной частотой необходимо определить, является ли совместное воздействие полей с различными частотами аддитивным по эффекту. Аддитивность необходимо рассматривать отдельно для эффектов теплового и электрического возбуждения. Если воздействие является аддитивным по эффекту, то должны выполняться основные ограничения, указанные ниже. Формулы, приведенные далее по тексту, применяются в практических ситуациях при воздействии полей соответствующих частот. Для эффектов электрической стимуляции, характерной при частотах полей до 10 МГц, следует суммировать плотности индукционного тока согласно выражению:

$$\sum_{i=1\Gamma\text{ц}}^{10\text{МГц}} \frac{J_i}{J_{L,i}} \leq 1, \quad (5)$$

Для тепловых эффектов, характерных при воздействии ЭМП с частотой выше 100 кГц, следует суммировать значения SAR и плотности потоков энергии согласно следующему выражению:

$$\sum_{i=100\text{кГц}}^{10\text{ГГц}} \frac{SAR_i}{SAR_L} + \sum_{i>10\text{ГГц}} \frac{S_i}{S_L} \leq 1, \quad (6)$$

где

J_i = плотность тока, индуцированного полем с частотой i ;

$J_{L,i}$ = ограничение по плотности индукционного тока при частоте поля i , указанное в таблице 4;

SAR_i = значение SAR в результате воздействия поля с частотой i ;

SAR_L = ограничение по SAR, указанное в таблице 4;

S_L = ограничение по плотности потока энергии, указанное в таблице 5; и

S_i = плотность потока энергии поля с частотой i .

Для практического применения основных ограничений необходимо использовать следующие критерии по контролируемым уровням для напряженности полей.

Для плотности индукционного тока и эффектов электрической стимуляции, характерных при воздействии электромагнитных полей с частотой до 10 МГц, измеренные значения должны удовлетворять следующим двум требованиям:

$$\sum_{i=1\Gamma\text{ц}}^{1\text{МГц}} \frac{E_i}{E_{L,i}} + \sum_{i>1\text{МГц}}^{10\text{МГц}} \frac{E_i}{a} \leq 1, \quad (7)$$

и

$$\sum_{j=1\Gamma\text{ц}}^{65\text{кГц}} \frac{H_j}{H_{L,j}} + \sum_{j>65\text{кГц}}^{10\text{МГц}} \frac{H_j}{b} \leq 1, \quad (8)$$

где:

E_i = напряженность электрического поля с частотой i ;

$E_{L,i}$ = контролируемые уровни для электрического поля, указанные в таблицах 6 и 7;

H_j = напряженность магнитного поля с частотой j ;

$H_{L,j}$ = контролируемые уровни для магнитного поля, указанные в таблицах 6 и 7;

a = 610 В м⁻¹ для производственных условий воздействия и 87 В м⁻¹ для населения; и

b = 24,4 А м⁻¹ (30,7 мкТл) для производственных условий воздействия и 5 А м⁻¹ (6,25 мкТл) для населения.

Постоянные a и b используются для электрического поля при частотах выше 1 МГц и для магнитного поля при частотах выше 65 кГц, т.к. суммирование основано на плотности индукционного тока и эффектах электрической стимуляции, а не тепловых эффектов. Тепловые эффекты лежат в основе для $E_{L,i}$ и $H_{L,j}$ при частотах выше 1 МГц и 65 кГц соответственно и указаны в таблицах 6 и 7.

Для тепловых эффектов, характерных при воздействии электромагнитных полей с частотой выше 100 кГц, измеренные значения должны удовлетворять следующим двум требованиям:

$$\sum_{i=100\text{кГц}}^{1\text{МГц}} \left(\frac{E_i}{c} \right)^2 + \sum_{i>1\text{МГц}}^{300\text{ГГц}} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2 \leq 1, \quad (9)$$

и

$$\sum_{j=100\text{кГц}}^{1\text{МГц}} \left(\frac{H_j}{d} \right)^2 + \sum_{j>1\text{МГц}}^{300\text{ГГц}} \left(\frac{H_j}{H_{L,j}} \right)^2 \leq 1, \quad (10)$$

где:

E_i = напряженность электрического поля с частотой i ;

$E_{L,i}$ = контролируемые уровни для электрического поля, указанные в таблицах 6 и 7;

H_j = напряженность магнитного поля с частотой j ;

$H_{L,j}$ = контролируемые уровни для магнитного поля, указанные в таблицах 6 и 7;

$c = 610/f$ В м⁻¹ (где f – частота в МГц) для производственных условий воздействия и $87/f^{1/2}$ В м⁻¹ для населения; и

$d = 1,6/f$ А м⁻¹ (где f – частота в МГц) для производственных условий воздействия и $0,73/f$ для населения.

Для токов в конечностях и токов прикосновения, соответственно, должны применяться следующие требования:

$$\sum_{k=10\text{МГц}}^{110\text{МГц}} \left(\frac{I_k}{I_{L,k}} \right)^2 \leq 1, \quad \sum_{n=1\text{Гц}}^{110\text{МГц}} \left(\frac{I_n}{I_{C,n}} \right)^2 \leq 1 \quad (11)$$

где:

I_k = сила тока в конечности при воздействии электромагнитного поля с частотой k ;

$I_{L,k}$ = контролируемые уровни силы тока для конечностей (см. таблицу 9);

I_n = сила тока прикосновения при воздействии электромагнитного поля с частотой n ; и

$I_{C,n}$ = контролируемые уровни тока прикосновения для частоты поля n (см. таблицу 8).

Эти формулы приведены для наихудших условий воздействия полей от различных источников. На практике, как правило, типичные условия воздействия требуют менее жестких ограничений, чем приведенные выше выражения для контролируемых уровней.

ЗАЩИТНЫЕ МЕРЫ

МКЗНИ отмечает, что промышленные предприятия, вызывающие воздействие электрических и магнитных полей, несут ответственность за выполнение нормативов.

Меры по обеспечению безопасности в производственных условиях включают инженерный и административный контроль, индивидуальные программы защиты, медицинский осмотр (ILO 1994). В случае, если на рабочем месте превышаются основные ограничения, необходимо предпринимать соответствующие действия по защите персонала.

На первом этапе следует провести инженерный контроль с целью возможного снижения излучений от оборудования до приемлемых уровней. Такой контроль включает применение эффективного защитного оборудования и, где необходимо, использование защитной блокировки или других механизмов, позволяющих обеспечить защиту здоровья на рабочем месте.

Административный контроль, включающий ограничение доступа или применение звуковых или визуальных предупреждений, должен проводиться совместно с инженерным контролем. Индивидуальные меры защиты, например, спецодежда, могут оказаться полезными в определенных ситуациях, и должны рассматриваться как последнее средство защиты для обеспечения безопасности на рабочем месте. Приоритет необходимо отдавать инженерному и административному контролю. Более того, в случае применения таких мер безопасности, как использование изолирующих перчаток для защиты от электроразрядов и ожогов при воздействии высокочастотных полей, необходимо, чтобы не превышались основные ограничения, т.к. изоляция защищает только от косвенного воздействия электромагнитных полей.

За исключением использования спецодежды и других мер индивидуальных защиты, для населения могут быть применены те же защитные меры в любых возможных случаях, в которых могут быть превышены контролируемые уровни. Кроме того, необходимо установить правила, выполнение которых предотвратит:

- Интерференцию с медицинским электронным оборудованием и приборами (включая имплантированные электрокардиостимуляторы);
- Детонацию электровзрывных приборов (детонаторов); и
- Пожары и взрывы в результате воспламенения горючих материалов от искровых разрядов.

Благодарности – МКЗНИ выражает благодарность организациям, оказавшим финансовую поддержку: Международной ассоциации по радиационной защите, Всемирной Организации Здравоохранения, Организации Объединенных Наций (программа по окружающей среде), Международной Организации Труда, Европейской Комиссии, Правительству Германии.

Перевод с англ. выполнен сотрудником биофизической лаборатории Уральского научно-практического центра радиационной медицины (г. Челябинск) Шагиной Н.Б. С вопросами, комментариями и замечаниями по переводу документа на русский язык обращаться по email: nata@urcrm.chel.su В случае разногласий между английской и русской версиями текста, необходимо обращаться к оригиналу на англ. яз., опубликованному в журнале *Health Physics*. Шагина Н.Б. выражает благодарность Меркулову А.В., сотруднику Центра электромагнитной безопасности (г. Москва), за обсуждения и комментарии к переводу.

Ссылка на руководства International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Physics* 74(4):494-522; 1998

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Adair, E. R.; Adams, B. W.; Akel, G. M. Minimal changes in hypothalamic temperature accompany microwave-induced alteration of thermoregulatory behavior. *Bioelectromagnetics* 5:13–30; 1984.
- Adair, E. R.; Adams, B. W. Microwaves modify thermoregulatory behavior in squirrel monkey. *Bioelectromagnetics* 1:1–20; 1980.
- Albert, E. N.; Slaby, F.; Roche, J.; Loftus, J. Effect of amplitude modulated 147 MHz radiofrequency radiation on calcium ion efflux from avian brain tissue. *Radiat. Res.* 109:19 – 27; 1987.
- Allen, S. G.; Bernhardt, J. H.; Driscoll, C. M. H.; Grandolfo, M.; Mariutti, G. F.; Matthes, R.; McKinlay, A. F.; Steinmetz, M.; Vecchia, P.; Whillock, M. Proposals for basic restrictions for protection against occupational exposure to electromagnetic non-ionizing radiations. Recommendations of an International Working Group set up under the auspices of the Commission of the European Communities. *Phys. Med.* VII:77– 89; 1991.
- American Conference of Government Industrial Hygienists. Threshold limit values for chemical substances and physical agents and biological exposure indices. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists; 1996.
- Astumian, R. D.; Weaver, J. C.; Adair, R. K. Rectification and signal averaging of weak electric fields by biological cells. *PNAS* 92:3740 –3743; 1995.
- Balcer-Kubiczek, E. K.; Harrison, G. H. Neoplastic transformation of C3H/10T1/2 cells following exposure to 120 Hz modulated 2.45 GHz microwaves and phorbol ester tumor promoter. *Radiat. Res.* 126:65–72; 1991.
- Baris, D.; Armstrong, B. G.; Deadman, J.; Theriault, G. A mortality study of electrical utility workers in Quebec. *Occ. Environ. Med.* 53:25–31; 1996.
- Barron, C. I.; Baraff, A. A. Medical considerations of exposure to microwaves (radar). *J. Am. Med. Assoc.* 168:1194 –1199; 1958.
- Baum, A.; Mevissen, M.; Kamino, K.; Mohr, U.; Loeschner, W. A histopathological study on alterations in DMBA-induced mammary carcinogenesis in rats with 50 Hz, 100 mT magnetic field exposure. *Carcinogenesis* 16:119 –125; 1995.
- Bawin, S. M.; Gavalas-Medici, R. J.; Adey, W. R. Reinforcement of transient brain rhythms by amplitude modulated VHF fields. In: Llauro, J. G.; Sances, A.; Battocletti, J. H., eds. *Biological and clinical effects of low frequency magnetic and electric fields*. Springfield, IL: Charles C. Thomas; 1974: 172–186.
- Bawin, S. M.; Kaczmarek, L. K.; Adey, W. R. Effects of modulated VHF fields on the central nervous system. *Ann. NY Acad. Sci.* 274:74–81; 1975.
- Beall, C.; Delzell, E.; Cole, P.; Brill, I. Brain tumors among electronics industry workers. *Epidemiology* 7:125–130; 1996.
- Beniashvili, D. S.; Bilanishvili, V. G.; Menabde, M. Z. The effect of low-frequency electromagnetic fields on the development of experimental mammary tumors. *Vopr. Onkol.* 37:937–941; 1991.
- Bergqvist, U. Pregnancy outcome and VDU work—a review. In: Luczak, H.; Cakir, A.; An Cakir, G., eds. *Work with display units '92—Selected Proceedings of the 3rd International Conference WWDO '92, Berlin Germany, 1–4 September 1992*. Amsterdam: Elsevier; 1993: 70–76.
- Bernhardt, J. H. The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within the frequency range of 1 Hz to 30 MHz. *Radiat. Environ. Biophys.* 16:309 –323; 1979.

- Bernhardt, J. H. The establishment of frequency dependent limits for electric and magnetic fields and evaluation of indirect effect. *Radiat. Environ. Biophys.* 27:1–27; 1988.
- Bernhardt, J. H. Basic criteria of ELF-standards: worldwide achievement in public and occupational health protection against radiation. Proceedings of the Eighth International Congress of the International Radiation Protection Association. Geneva: IRPA; 1992: 933–936.
- Blackman, C. F.; Elder, J. A.; Weil, C. M.; Benane, S. G.; Eichinger, D. C.; House, D. E. Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation: effects of modulation frequency and field strength. *Radio Sci.* 14:93–98; 1979.
- Blank, M., ed. *Electromagnetic fields: biological interactions and mechanisms*. Washington, DC: American Chemical Society Press; 1995.
- Bracken, M. B.; Belanger, K.; Hellenbrand, K.; Dlugosz, L.; Holford, T. R.; McSharry, J. E.; Addesso, K.; Leaderer, B. Exposure to electromagnetic fields during pregnancy with emphasis on electrically heated beds: association with birthweight and intrauterine growth. *Epidemiol.* 6:263–270; 1995.
- Brent, R. L.; Beckman, D. A.; Landel, C. P. Clinical teratology. *Curr. Opin. Pediatr.* 5:201–211; 1993.
- Byus, C. V.; Lundak, R. L.; Fletcher, R. M.; Adey, W. R. Alterations in protein kinase activity following exposure of cultured human lymphocytes to modulated microwave fields. *Bioelectromagnetics* 5:341–351; 1984.
- Byus, C. V.; Pieper, S. E.; Adey, W. R. The effects of low-energy 60 Hz environmental electromagnetic fields upon the growth-related enzyme ornithine decarboxylase. *Carcinogenesis* 8:1385–1389; 1987.
- Byus, C. V.; Kartun, K.; Pieper, S.; Adey, W. R. Increased ornithine decarboxylase activity in cultured cells exposed to low energy modulated microwave fields and phorbol ester tumor promoters. *Cancer Res.* 48:4222–4226; 1988.
- Chatterjee, I.; Wu, D.; Gandhi, O. P. Human body impedance and threshold currents for perception and pain for contact hazards analysis in the VLF-MF band. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 33:486–494; 1986.
- Chen, J. Y.; Gandhi, O. P. Thermal implications of high SARs in the body extremities at the ANSI-recommended MFVHF safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 35:435–441; 1988.
- Chernoff, N.; Rogers, J. M.; Kavet, R. A review of the literature on potential reproductive and developmental toxicity of electric and magnetic fields. *Toxicology* 74:91–126; 1992.
- Guy, A. W.; Lin, J. C.; Kramar, P. O.; Emery, A. Effect of 2450-MHz radiation on the rabbit eye. *IEEE Transactions on Microwave Theory Technique* 23:492–498; 1975.
- Heath, C. W., Jr. Electromagnetic field exposure and cancer: a review of epidemiologic evidence. *Ca. Cancer J. Clin.* 46:29–44; 1996.
- Hocking, B.; Gordon, I. R.; Grain, M. L.; Hatfield, G. E. Cancer incidence and mortality and proximity to TV towers. *Med. J. Australia* 165:601–605; 1996.
- Hoque, M.; Gandhi, O. P. Temperature distributions in the human leg for VLF-VHF exposures at the ANSI recommended safety levels. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 35:442–449; 1988.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys.* 66:100–106; 1994.

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters. *Health Phys.* 70:587–593; 1996.
- International Commission on Radiological Protection. Human respiratory tract model for radiological protection. Oxford: Pergamon Press; ICRP Publication 66; 1994.
- Institute of Electrical and Electronic Engineers. Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. New York: Institute of Electrical and Electronic Engineers; IEEE C95.1-1991; 1992.
- International Labour Organisation. Protection of workers from power frequency electric and magnetic fields. Geneva: International Labour Office; Occupational Safety and Health Series, No. 69; 1994.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Guidelines on limits of exposure to radiofrequency electromagnetic fields in the frequency range from 100 kHz to 300 GHz. *Health Phys.* 54:115–123; 1988.
- International Radiation Protection Association/International Non-Ionizing Radiation Committee. Interim guidelines on limits of exposure to 50/60 Hz electric and magnetic fields. *Health Phys.* 58:113–121; 1990.
- Jokela, K.; Puranen, L.; Gandhi, O. P. Radio frequency currents induced in the human body for medium-frequency/ high-frequency broadcast antennas. *Health Phys.* 66:237–244; 1994.
- Kallen, B.; Malmquist, G.; Moritz, U. Delivery outcome among physiotherapists in Sweden: Is non-ionizing radiation a fetal hazard? *Arch. Environ. Health* 37:81–85; 1982.
- Kamimura, Y.; Sato, K.; Saiga, T.; Amemiya, Y. Effects of 2.45 GHz microwave irradiation on monkey eyes. *IEICE Trans. Communications* E77-B:762–765; 1994.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Diaz Ricci, J. C.; Kirschvink, S. J. Magnetite in human tissues: a mechanism for the biological effects of weak ELF magnetic fields. *Bioelectromagnetics Suppl.* 1:101–113; 1992a.
- Kirschvink, J. L.; Kobayashi-Kirschvink, A.; Woodford, B. J. Magnetite biomineralization in the human brain. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 89:7683–7687; 1992b.
- Kues, H. A.; Hirst, L. W.; Luty, G. A.; D’Anna, S. A.; Dunkelberger, G. R. Effects of 2.45-GHz microwaves on primate corneal endothelium. *Bioelectromagnetics* 6:177–188; 1985.
- Kuster, N.; Balzano, Q. Energy absorption mechanisms by biological bodies in the near-field of dipole antennas. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 42:17–23; 1992.
- Lacy-Hulbert, A.; Wilkins, R. C.; Hesketh, T. R.; Metcalfe, J. C. No effect of 60 Hz electromagnetic fields on MYC or beta-actin expression in human leukemic cells. *Rad Res.* 144:9–17; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16:207–210; 1995.
- Lai, H.; Singh, N. P. Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiation Biol.* 69:513–521; 1996.
- Larsen, A. I.; Olsen, J.; Svane, O. Gender-specific reproductive outcome and exposure to high-frequency electromagnetic radiation among physiotherapists. *Scand. J. Work Environ. Health* 17:324–329; 1991.
- Li, D.; Ceckoway, H.; Mueller, B. A. Electric blanket use during pregnancy in relation to the risk of congenital urinary tract anomalies among women with a history of subfertility. *Epidemiology* 6:485–489; 1995.

- Li, C. Y.; Theriault, G.; Lin, R. S. Epidemiological appraisal of studies of residential exposure to power frequency magnetic fields and adult cancers. *Occup. Environ. Med.* 53:505–510; 1996.
- Liburdy, R. P. Biological interactions of cellular systems with time-varying magnetic fields. *Ann. NY Acad. Sci.* 649:74–95; 1992.
- Lillienfeld, A. M.; Tonascia, J.; Tonascia, S.; Libauer, C. A.; Cauthen, G. M. Foreign service health status study— evaluation of health status of foreign service and other employees from selected eastern European posts. Final report. Washington, DC: Department of State; Contract No. 6025-619073, NTIS PB-288163; 1978.
- Lin, J. C. Microwave auditory effects and applications. Springfield, IL: Charles C. Thomas; 1978
- Lindbohm, M. L.; Hietanen, M.; Kyyro.nen, P.; Sallmen, M.; van Nandelstadh, P.; Taskinen, H.; Pekkarinen, M.; Ylikoski, M.; Hemminki, K. Magnetic fields of video display terminals and spontaneous abortion. *Am. J. Epidemiol.* 136:1041–1051; 1992.
- Linnet, M. S.; Hatch, E. E.; Kleinerman, R. A.; Robinson, L. L.; Kaune, W. T.; Friedman, D. R.; Severson R. K.; Haines, C. M.; Hartsock, C. T.; Niwa, S.; Wacholder, S.; Tarone, R. E. Residential exposure to magnetic fields and acute lymphoblastic leukemia in children. *New Eng. J. Med.* 337:1–7; 1997.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Mullins, J. M. Effect of coherence time of the applied magnetic field on ornithine decarboxylase activity. *Biochem. Biophys. Res. Comm.* 178:862–865; 1991.
- Litovitz, T. A.; Montrose, C. J.; Wang, W. Dose-response implications of the transient nature of electromagnetic-fieldinduced bioeffects: theoretical hypotheses and predictions. *Bioelectromagnetics Suppl.* 1:237–246; 1992.
- Litovitz, T. A.; Krause, D.; Penafiel, M.; Elson, E. C.; Mullins, J. M. The role of coherence time in the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity. *Bioelectromagnetics* 14:395–403; 1993.
- Loscher, W.; Mevissen, M.; Lehmacher, W.; Stamm, A. Tumor promotion in a breast cancer model by exposure to a weak alternating magnetic field. *Cancer Letters* 71:75–81; 1993.
- Loscher, W.; Mevissen, M. Linear relationship between flux density and tumor co-promoting effect of prolonging magnetic exposure in a breast cancer model. *Cancer Letters* 96:175–180; 1995.
- Lovsund, P.; O. berg, P.; Nilsson, S. E. G. Magneto- and electrophosphenes: a comparative study. *Med. Biol. Eng. Computing* 18:758–764; 1980.
- London, S. J.; Thomas, D. C.; Bowman, J. D.; Sobel, E.; Cheng, T. C.; Peters, J. M. Exposure to residential electric and magnetic fields and risk of childhood leukemia. *Am. J. Epidemiol.* 134:923–937; 1991.
- Loomis, D. P.; Savitz, D. A.; Ananth, C. V. Breast cancer mortality among female electrical workers in the United States. *J. Nat. Cancer Inst.* 86:921–925; 1994.
- Lyle, D. B.; Schechter, P.; Adey, W. R.; Lundak, R. L. Suppression of T-lymphocyte cytotoxicity following exposure to sinusoidally amplitude-modulated fields. *Bioelectromagnetics* 4:281–292; 1983.
- Magin, R. L.; Liburdy, R. P.; Persson, B. Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann. NY Acad. Sci.* 649; 1992.
- Matanoski, G. M.; Breyse, P. N.; Elliott, E. A. Electromagnetic field exposure and male breast cancer. *Lancet* 337:737; 1991.
- McCann, J.; Dietrich, F.; Rafferty, C.; Martin, A. A critical review of the genotoxic potential of electric and magnetic fields. *Mutation Res.* 297:61–95; 1993.

- McDowall, M. Mortality in persons resident in the vicinity of electricity transmission facilities. *Br. J. Cancer* 53:271–279; 1985.
- McKinlay, A. F.; Andersen, J. B.; Bernhardt, J. H.; Grandolfo, M.; Hossmann, K.-A.; Mild, K. H.; Swerdlow, A. J.; Van Leeuwen, M. Verschaeve, L.; Veyret, B. Radiotelephones and human health—proposal for a European research programme. Report of a European Commission Expert Group. Brussels: European Commission Directorate General XIII; 1996.
- McLean, J.; Stuchly, M. A.; Mitchel, R. E.; Wilkinson, D.; Yang, H.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Schunk, M.; Callary, E.; Morrison, D. Cancer promotion in a mouse-skin model by a 60-Hz magnetic field: II. Tumor development and immune response. *Bioelectromagnetics* 12:273–287; 1991.
- Mevissen, M.; Stamm, A.; Buntenkotter, S.; Zwingelberg, R.; Wahnschaffe, U.; Lo.scher, W. Effects of magnetic fields on mammary tumor development induced by 7,12-dimethylbenz(a)anthracene in rats. *Bioelectromagnetics* 14:131–143; 1993.
- Mevissen, M.; Kietzmann, M.; Lo.scher, W. In vivo exposure of rats to weak alternating magnetic field increases ornithine decarboxylase activity in the mammary gland by a similar extent as the carcinogen DMBA. *Cancer Letters* 90:207–214; 1995.
- Michaelis, J.; Schuz, J.; Meinert, R.; Menger, M.; Grigat, J.-P.; Kaatsch, P.; Kaletsch, U.; Miesner, A.; Stamm, A.; Brinkmann, K.; Karner, H. Childhood leukemia and electromagnetic fields: results of a population-based case-control study in Germany. *Cancer Causes and Control* 8:167–174; 1997.
- Michaelson, S. M. Biological effects and health hazards of RF and MW energy: fundamentals and overall phenomenology. In: Grandolfo, M.; Michaelson, S. M.; Rindi, A., eds. *Biological effects and dosimetry of non-ionizing radiation*. New York: Plenum Press; 1983: 337–357.
- Michaelson, S. M.; Elson, E. C. Modulated fields and ‘window’ effects. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1996: 435–533.
- Milham, S., Jr. Mortality from leukemia in workers exposed to electrical and magnetic fields. *New Engl. J. Med.* 307:249; 1982.
- Miller, A. B.; To, T.; Agnew, D. A.; Wall, C.; Green, L. M. Leukemia following occupational exposure to 60-Hz electric and magnetic fields among Ontario electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 144:150–160; 1996.
- Murphy, J. C.; Kaden, D. A.; Warren, J.; Sivak, A. Power frequency electric and magnetic fields: a review of genetic toxicology. *Mutation Res.* 296:221–240; 1993.
- Myers, A.; Cartwright, R. A.; Bonnell, J. A.; Male, J. C.; Cartwright, S. C. Overhead power lines and childhood cancer. International Conference of Electric and Magnetic Fields in Med. and Biology, London, December 4–5. IEEE Conf. Publ. No. 257; 1985:126.
- National Academy of Science/National Research Council. Possible health effects of exposure to residential electric and magnetic fields. Washington, DC: National Academy Press; 1996.
- National Council on Radiation Protection. Radiofrequency electromagnetic fields. Properties, quantities and units, biophysical interaction, and measurement. Washington, DC: National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 67; 1981.
- National Council on Radiation Protection. A practical guide to the determination of human exposure to radiofrequency fields. Washington, DC: National Council on Radiation Protection and Measurement; NCRP Report 119; 1993.
- National Radiological Protection Board. Biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: III: Radiofrequency and microwave radiation. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; Report R-240; 1991.

- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Report of an Advisory Group on Non-ionizing Radiation. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; NRPB Documents 3(1); 1992.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Summary of the views of the Advisory Group on Non-ionising Radiation on epidemiological studies published since its 1992 report. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; NRPB Documents 4(5); 1993.
- National Radiological Protection Board. Health effects related to the use of visual display units. Report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; NRPB Documents 5(2); 1994a.
- National Radiological Protection Board. Electromagnetic fields and the risk of cancer. Supplementary report by the Advisory Group on Non-ionising Radiation of 12 April 1994. *Radiol. Prot. Bull.* 154:10–12; 1994b.
- Olsen, J. H.; Nielsen, A.; Schulgen, G. Residence near high voltage facilities and the risk of cancer in children. *Danish Cancer Registry; AG-NIR*, 1-26; 1993. Oak Ridge Associated Universities. Health effects of low frequency electric and magnetic fields. Oak Ridge, TN: Oak Ridge Associated Universities; ORAU 92/F9; 1992.
- Ouellet-Hellstrom, R.; Stewart, W. F. Miscarriages among female physical therapists, who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.* 138:775–786; 1993.
- Phillips, J. L.; Haggren, W.; Thomas, W. J.; Ishida-Jones, T.; Adey, W. R. Magnetic field-induced changes in specific gene transcription. *Biochim. Biophys. Acta* 1132:140–144; 1992.
- Polk, C.; Postow, E. Biological effects of electromagnetic fields. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press; 1996.
- Polson, M. J. R.; Barker, A. T.; Freeston, I. L. Stimulation of nerve trunks with time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing* 20:243–244; 1982.
- Postow, E.; Swicord, M. L. Modulated fields and ‘window’ effects. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Handbook of biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1996: 535–580.
- Preston-Martin, S.; Peters, J. M.; Yu, M. C.; Garabrant, D. H.; Bowman, J. D. Myelogenous leukemia and electric blanket use. *Bioelectromagnetics* 9:207–213; 1988.
- Preston-Martin, S.; Navidi, W.; Thomas, D.; Lee, P.-J.; Bowman, J.; Pogoda, J. Los Angeles study of residential magnetic fields and childhood brain tumors. *Am. J. Epidemiol.* 143:105–119; 1996a.
- Preston-Martin, S.; Gurney, J. G.; Pogoda, J. M.; Holly, E. A.; Mueller, B. A. Brain tumor risk in children in relation to use of electric blankets and water bed heaters: results from the United States West Coast Childhood Brain Tumor Study. *Am. J. Epidemiol.* 143:1116–1122; 1996b.
- Ramsey, J. D.; Kwon, Y. C. Simplified decision rules for predicting performance loss in the heat. In: *Proceedings Seminar on heat stress indices*. Luxembourg: CEC; 1988.
- Rannug, A.; Ekstrom, T.; Mild, K. H.; Holmberg, B.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. A study on skin tumour formation in mice with 50 Hz magnetic field exposure. *Carcinogenesis* 14:573–578; 1993a.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstrom, T.; Mild, K. H. Rat liver foci study on coexposure with 50 Hz magnetic fields and known carcinogens. *Bioelectromagnetics* 14:17–27; 1993b.

- Rannug, A.; Holmberg, B.; Mild, K. H. A rat liver foci promotion study with 50-Hz magnetic fields. *Environ. Res.* 62:223–229; 1993c.
- Rannug, A.; Holmberg, B.; Ekstrom, T.; Mild, K. H.; Gimenez-Conti, I.; Slaga, T. J. Intermittent 50 Hz magnetic field and skin tumour promotion in Sencar mice. *Carcinogenesis* 15:153–157; 1994.
- Reilly, J. P. Peripheral nerve stimulation by induced electric currents: exposure to time-varying magnetic fields. *Med. Biol. Eng. Computing* 3:101–109; 1989.
- Reilly, J. P. *Electrical stimulation and electropathology*. Cambridge, MA: Cambridge University Press; 1992.
- Repacholi, M. H. Low-level exposure to radiofrequency fields: health effects and research needs. *Bioelectromagnetics* 19:1–19; 1998.
- Repacholi, M. H.; Stolwijk, J. A. J. Criteria for evaluating scientific literature and developing exposure limits. *Rad. Protect. Australia* 9:79–84; 1991.
- Repacholi, M. H.; Cardis, E. Criteria for EMF health risk assessment. *Rad. Protect. Dosim.* 72:305–312; 1997.
- Repacholi, M. H.; Basten, A.; Gebiski, V.; Noonan, D.; Finnie, J.; Harris, A. W. Lymphomas in Em-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Rad. Res.* 147:631–640; 1997.
- Robinette, C. D.; Silverman, C.; Jablon, S. Effects upon health of occupational exposure to microwave radiation (radar). *Am. J. Epidemiol.* 112:39–53; 1980.
- Rothman, K. J.; Chou, C. K.; Morgan, R.; Balzano, Q.; Guy, A. W.; Funch, D. P.; Preston-Martin, S.; Mandel, J.; Steffens, R.; Carlo, G. Assessment of cellular telephone and other radio frequency exposure for epidemiologic research. *Epidemiology* 7:291–298; 1996a.
- Rothman, K. J.; Loughlin, J. E.; Funch, D. P.; Dreyer, N. A. Overall mortality of cellular telephone customers. *Epidemiology* 7:303–305; 1996b.
- Ruppe, I.; Hentschel, K.; Eggert, S.; Goltz, S. Experimentelle Untersuchungen zur Wirkung von 50 Hz Magnetfeldern. *Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Fb 11.003*; 1995 (in German).
- Saffer, J. D.; Thurston, S. J. Cancer risk and electromagnetic fields. *Nature* 375:22–23; 1995.
- Salford, L. G.; Brun, A.; Eberhardt, J. L. Experimental studies of brain tumor development during exposure to continuous and pulsed 915 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 30:313–318; 1993.
- Sander, R.; Brinkmann, J.; Kuhn, B. Laboratory studies on animals and human beings exposed to 50 Hz electric and magnetic fields. *CIGRE, International Congress on Large High Voltage Electric Systems, Paris, 1–9 September; CIGRE Paper 36–01*; 1982.
- Santini, R.; Hosni, M.; Deschaux, P.; Packeco, H. B16 melanoma development in black mice exposed to low-level microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 9:105–107; 1988.
- Sarkar, S.; Ali, S.; Behari, J. Effect of low power microwave on the mouse genome: a direct DNA analysis. *Mutation Res.* 320:141–147; 1994.
- Savitz, D. A. Overview of epidemiological research on electric and magnetic fields and cancer. *Am. Ind. Hyg. Ass. J.* 54:197–204; 1993.
- Savitz, D. A.; Ahlbom, A. Epidemiologic evidence on cancer in relation to residential and occupational exposure. In: *Biologic effects of electric and magnetic fields, Vol. 2*. New York: Academic Press; 1994: 233–262.

- Savitz, D. A.; Loomis, D. P. Magnetic field exposure in relation to leukemia and brain cancer mortality among electric utility workers. *Am. J. Epidemiol.* 141:123–134; 1995.
- Savitz, D. A.; Wachtel, H.; Barnes, F. A.; John, E. M.; Tvrdik, J. G. Case-control study of childhood cancer and exposure to 60-Hz magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:21–38; 1988.
- Savitz, D. A.; John, E. M.; Kleckner, R. C. Magnetic field exposure from electric appliances and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.* 131:763–773; 1990.
- Schnorr, T. M.; Grajewski, B. A.; Hornung, R. W.; Thun, M. J.; Egeland, G. M.; Murray, W. E.; Conover, D. L.; Halperin, W. E. Video display terminals and the risk of spontaneous abortion. *New Eng. J. Med.* 324:727–733; 1991.
- Schreiber, G. H.; Swaen, G. M.; Meijers, J. M.; Slangen, J. J.; Sturmans, F. Cancer mortality and residence near electricity transmission equipment: a retrospective cohort study. *Int. J. Epidemiol.* 22:9–15; 1993.
- Selmaoui, B.; Lambrozo, J.; Touitou, Y. Magnetic fields and pineal function in humans: evaluation of nocturnal acute exposure to extremely low frequency magnetic fields on serum melatonin and urinary 6-sulfatoxymelatonin circadian rhythms. *Life Sci.* 58:1539–1549; 1996.
- Selvin, S.; Schulman, J.; Merrill, D. W. Distance and risk measures for the analysis of spatial data: a study of childhood cancers. *Soc. Sci. Med.* 34:769–777; 1992.
- Severson, R. K.; Stevens, R. G.; Kaune, W. T.; Thomas, D. B.; Houser, L.; Davis, S.; Sever, L. E. Acute nonlymphocytic leukemia and residential exposure to power frequency magnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 128:10–20; 1988.
- Shaw, G. W.; Croen, L. A. Human adverse reproductive outcomes and electromagnetic fields exposures: review of epidemiologic studies. *Environ. Health Persp.* 101:107–119; 1993.
- Shellock, F. G.; Crues, J. V. Temperature, heart rate, and blood pressure changes associated with clinical imaging at 1.5 T. *Radiology* 163:259–262; 1987.
- Sienkiewicz, Z. J.; Saunders, R. D.; Kowalczyk, C. I. The biological effects of exposure to non-ionising electromagnetic fields and radiation: II Extremely low frequency electric and magnetic fields. Chilton, UK: National Radiological Protection Board; NRPB R239; 1991.
- Sienkiewicz, Z. J.; Cridland, N. A.; Kowalczyk, C. I.; Saunders, R. D. Biological effects of electromagnetic fields and radiations. In: Stone, W. R.; Hyde, G., eds. *The review of radio science: 1990–1992*. Oxford: Oxford University Press; 1993: 737–770.
- Silny, J. The influence threshold of a time-varying magnetic field in the human organism. In: Bernhardt, J. H., ed. *Biological effects of static and extremely-low-frequency magnetic fields*. Munich: MMV Medizin Verlag; 1986: 105–112.
- Sliney, D.; Wolbarsht, M. *Safety with laser and other optical sources*. London: Plenum Press; 1980.
- Sobel, E.; Davanipour, Z. EMF exposure may cause increased production of amyloid beta and eventually lead to Alzheimer's disease. *Neurology* 47:1594–1600; 1996.
- Stern, S.; Margolin, L.; Weiss, B.; Lu, S. T.; Michaelson, S. M. Microwaves: effects on thermoregulatory behavior in rats. *Science* 206:1198–1201; 1979.
- Stevens, R. G. Electric power use and breast cancer: a hypothesis. *Am. J. Epidemiol.* 125:556–561; 1987.
- Stevens, R. G.; Davis, S.; Thomas, D. B.; Anderson, L. E.; Wilson, B. W. Electric power, pineal function and the risk of breast cancer. *The FASEB Journal* 6:853–860; 1992.
- Stevens, R. G.; Davis, S. The melatonin hypothesis: electric power and breast cancer. *Environ. Health Persp.* 104(Suppl. 1):135–140; 1996.

- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on mood and verbal reasoning skills. *Br. J. Ind. Med.* 43:339–349; 1986.
- Stollery, B. T. Effects of 50 Hz electric currents on vigilance and concentration. *Br. J. Ind. Med.* 44:111–118; 1987.
- Stuchly, M. A.; McLean, J. R. N.; Burnett, R.; Goddard, M.; Lecuyer, D. W.; Mitchel, R. E. J. Modification of tumor promotion in the mouse skin by exposure to an alternating magnetic field. *Cancer Letters* 65:1–7; 1992.
- Stuchly, M. A.; Xi, W. Modelling induced currents in biological cells exposed to low-frequency magnetic fields. *Phys. Med. Biol.* 39:1319–1330; 1994.
- Szmigielski, S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci. Tot. Environ.* 180:9–17; 1996.
- Szmigielski, S.; Szudinski, A.; Pietraszek, A.; Bielec, M.; Wrembel, J. K. Accelerated development of spontaneous and benzopyrene-induced skin cancer in mice exposed to 2450-MHz microwave radiation. *Bioelectromagnetics* 3:179–191; 1982.
- Szmigielski, S.; Bielec, M.; Lipski, S.; Sokolska, G. Immunologic and cancer-related aspects of exposure to low-level microwave and radiofrequency fields. In: Marino, A. A., ed. *Modern bioelectricity*. New York: Marcel Dekker; 1988: 861–925.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and human health effects of extremely-low-frequency magnetic fields. In: Anderson, L. E.; Stevens, R. G.; Wilson, B. W. eds. *Extremely low-frequency electromagnetic fields: the question of cancer*. Columbia, OH: Battelle Press; 1990: 291–315.
- Tenforde, T. S. Biological interactions of extremely-low frequency electric and magnetic fields. *Bioelectrochem. Bioenerg.* 25:1–17; 1991.
- Tenforde, T. S. Biological interactions and potential health effects of extremely-low-frequency magnetic fields from power lines and other common sources. *Ann. Rev. Public Health* 13:173–196; 1992.
- Tenforde, T. S. Cellular and molecular pathways of extremely low-frequency electromagnetic field interactions with living systems. In: Blank, M., ed. *Electricity and magnetism in biology and medicine*. San Francisco, CA: San Francisco Press; 1993: 1–8.
- Tenforde, T. S. Interaction of ELF magnetic fields with living systems. In: Polk, C.; Postow, E., eds. *Biological effects of electromagnetic fields*. Boca Raton, FL: CRC Press; 1996: 185–230.
- Tenforde, T. S.; Kaune, W. T. Interaction of extremely low frequency electric and magnetic fields with humans. *Health Phys.* 53:585–606; 1987.
- Theriault, G.; Goldberg, M.; Miller, A. B.; Armstrong, B.; Gue.nel, P.; Deadman, J.; Imbernon, E.; To, T.; Chevalier, A.; Cyr, D.; Wall, C. Cancer risks associated with occupational exposure to magnetic fields among electric utility workers in Ontario and Quebec, Canada, and France—1970–1989. *Am. J. Epidemiol.* 139:550–572; 1994.
- Tofani, S.; d'Amore, G.; Fiandino, G.; Benedetto, A.; Gandhi, O. P.; Chen, J. Y. Induced foot-currents in humans exposed to VHF radio-frequency EM fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 37:96; 1995.
- Tomenius, L. 50-Hz electromagnetic environment and the incidence of childhood tumors in Stockholm county. *Bioelectromagnetics* 7:191–207; 1986.
- Tynes, T.; Andersen, A.; Langmark, F. Incidence of cancer in Norwegian workers potentially exposed to electromagnetic fields. *Am. J. Epidemiol.* 136:81–88; 1992.

- Tynes, T.; Haldorsen, T. Electromagnetic fields and cancer in children residing near Norwegian high-voltage power lines. *Am. J. Epidemiol.* 145:219–226; 1997.
- Ueno, S. *Biological effects of magnetic and electromagnetic fields*. New York: Plenum Press; 1996.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Extremely low frequency (ELF) fields*. Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 35; 1984.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Magnetic fields*. Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 69; 1987.
- United Nations Environment Programme/World Health Organization/ International Radiation Protection Association. *Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva: World Health Organization; Environmental Health Criteria 137; 1993.
- Vena, J. E.; Graham, S.; Hellman, R.; Swanson, M.; Brasure, J. Use of electric blankets and risk of post-menopausal breast cancer. *Am. J. Epidemiol.* 134:180–185; 1991.
- Vena, J. E.; Freudenheim, J. L.; Marshall, J. R.; Laughlin, R.; Swanson, M.; Graham, S. Risk of premenopausal breast cancer and use of electric blankets. *Am. J. Epidemiol.* 140:974–979; 1994.
- Verkasalo, P. K. Magnetic fields and leukemia: risk for adults living next to power lines. *Scand. J. Work Environ. Health* 22(Suppl. 2):7–55; 1996.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Hongisto, M. Y.; Valjus, J. E.; Jorvinen, P. J.; Heikkilo, K. V.; Koskenvuo, M. Risk of cancer in Finnish children living close to power lines. *Br. Med. J.* 307:895–899; 1993.
- Verkasalo, P. K.; Pukkala, E.; Kaprio, J.; Heikkila, K. V.; Koskenvuo, M. Magnetic fields of high voltage power lines and risk of cancer in Finnish adults: nationwide cohort study. *Br. Med. J.* 313:1047–1051; 1996.
- Verreault, R.; Weiss, N. S.; Hollenbach, K. A.; Strader, C. H.; Daling, J. R. Use of electric blankets and risk of testicular cancer. *Am. J. Epidemiol.* 131:759–762; 1990.
- Walleczek, J. Electromagnetic field effects on cells of the immune system: the role of calcium signalling. *The FASEB Journal* 6:3177–3185; 1992.
- Walleczek, J.; Liburdy, R. P. Nonthermal 60 Hz sinusoidal magnetic-field exposure enhances ⁴⁵Ca²¹ uptake in rat thymocytes: dependence on mitogen activation. *FEBS Letters* 271:157–160; 1990.
- Wertheimer, N.; Leeper, E. Electrical wiring configurations and childhood cancer. *Am. J. Epidemiol.* 109:273–284; 1979.
- Williams, G. M. Comment on “Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells” by Henry Lai and Narendra P. Singh. *Bioelectromagnetics* 17:165; 1996.
- Xi, W.; Stuchly, M. A. High spatial resolution analysis of electric currents induced in men by ELF magnetic fields. *Appl. Comput. Electromagn. Soc. J.* 9:127–134; 1994.

ПРИЛОЖЕНИЕ:

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

Ближняя зона – область на расстоянии от излучающей антенны, не превышающем длину волны излучаемого ЭМП. Примечание: Значения напряженности магнитного поля (умноженной на сопротивление пространства) и напряженности электрического поля не равны и, на расстояниях от антенны меньших одной десятой длины волны, значительно изменяются пропорционально квадрату или кубу расстояния, если размеры антенны значительно меньше этого расстояния.

Воздействие в производственных условиях – все типы воздействия ЭМП на человека во время производственной деятельности.

Воздействие на население – все типы воздействия ЭМП на население, за исключением воздействия в производственных условиях и во время проведения медицинских процедур.

Волновое сопротивление – отношение комплексного числа (вектора), характеризующего поперечное электрическое поле в данной точке к комплексному числу (вектору), характеризующему поперечное магнитное поле в данной точке. В системе СИ выражается в омах (Ом).

Дальняя зона – область на расстоянии от излучающей антенны, превышающем длину волны излучаемого ЭМП. В дальней зоне составляющие электромагнитного поля (**E** и **H**) и направление распространения волны взаимно перпендикулярны, а фронт произвольной волны является плоским независимо от расстояния от источника.

Действующая или эффективная величина – определенные электрические эффекты пропорциональны квадратному корню среднего значения квадрата периодической функции (по одному периоду). Такая величина называется эффективной (или среднеквадратичной), т.к. она получается в результате возведения функции в квадрат, оценки среднего значения квадратичных значений и оценки квадратного корня из среднего значения.

Диэлектрическая постоянная – см. диэлектрическая проницаемость.

Диэлектрическая проницаемость – постоянная, характеризующая влияние изотропной среды на силы притяжения или отталкивания между наэлектризованными телами. Выражается в фарадах на метр (Ф м^{-1}). Относительная диэлектрическая проницаемость – отношение проницаемости материала и среды к проницаемости вакуума.

Длина волны – расстояние между двумя ближайшими точками гармонической волны в направлении ее распространения, находящимися в одинаковой фазе колебания.

Дозиметрия – измерение или расчет напряженности внутреннего электрического поля или плотности индукционного тока, удельной поглощенной энергии или распределения удельной поглощенной мощности у людей или животных в результате воздействия электромагнитных полей.

Гематоэнцефалический барьер – действующая концепция, позволяющая объяснить механизмы, ограничивающие доступ химических веществ, циркулирующих в крови, к клеткам внутри мозга. «Барьер» функционирует как мембрана, окружающая внутреннюю среду мозга. Мозговые капилляры, характеризующиеся особым строением эндотелия, формируют барьер, ограничивающий поступление веществ в мозг.

Глубина проникновения – для плоской электромагнитной волны, падающей на границу хорошо проводящего материала, глубина проникновения волны равна глубине, при которой напряженность поля волны уменьшается до $1/e$, или приблизительно до 37% от первоначального значения.

ELF – частота выше нуля и ниже 300 Гц.

Магнитная проницаемость – скалярная или векторная величина, произведение которой на напряженность магнитного поля, равно плотности магнитного потока. В системе СИ выражается в генри на метр (Гн м^{-1}). Примечание: для изотропных сред магнитная проницаемость является скалярной величиной, а для анизотропных сред – тензорной.

Микроволны – электромагнитное излучение с короткой длиной волны, практическое использование которого возможно с использованием волновода или других методов при их передаче и приеме. Примечание: в этом документе этот термин используется для обозначения излучения или полей в диапазоне частот от 300 МГц до 300 ГГц.

Напряженность магнитного поля – векторная физическая величина, **H**, которая наряду с плотностью магнитного потока характеризует магнитное поле в любой точке пространства. Выражается в амперах на метр (А м^{-1}).

Напряженность электрического поля – сила (**E**), действующая на стационарный положительный заряд, находящийся в данной точке в электрическом поле. В системе СИ выражается в вольт на метр (В м^{-1}).

Неионизирующее излучение (НИИ) – включает излучения и поля электромагнитного спектра, которые обычно не обладают достаточной энергией для ионизации вещества. Они характеризуются энергиями фотонов ниже 12 эВ, длиной волны выше 100 нм и частотой ниже $3 \cdot 10^{15}$ Гц.

Незатухающие колебания – колебания с постоянной амплитудой.

Нетепловой эффект – результат любого воздействия электромагнитного излучения на организм человека, который не связан с нагреванием.

Плотность магнитного потока – векторная физическая величина, **B**, которая характеризует силу, действующую со стороны магнитного поля на движущийся заряд или заряды. Выражается в теслах (Тл).

Плоская волна – электромагнитная волна, в которой векторы напряженности электрического и магнитного поля лежат в плоскости, перпендикулярной направлению волны и напряженность магнитного поля (с учетом волнового сопротивления вакуума) равна напряженности электрического поля.

Плотность потока энергии – при распространении радиоволн представляет количество энергии, переносимой электромагнитной волной за единицу времени, проходящей через единицу площади поверхности, расположенной перпендикулярной распространению волны. Выражается в ваттах на квадратный метр (Вт м^{-2}).

Плотность электрического тока – векторная величина, значение интеграла от которой по рассматриваемой поверхности равно силе тока через произвольную поверхность; среднее значение плотности тока в линейном проводнике представляет собой отношение силы тока к поперечному сечению проводника. В системе СИ выражается в амперах на кв. метр (А м^{-2}).

Поглощение – при распространении радиоволн, ослабление радиоволны в результате диссипации энергии волны, т.е. в результате превращения энергии в другие формы, например, в форму теплоты.

Радиочастота – любая частота, при которой электромагнитное излучение применимо для целей телекоммуникации. Примечание: в этом документе радиочастота относится к частотам в диапазоне 10 МГц – 300 ГГц.

Резонанс – изменение амплитуды в результате приближения или совпадения частоты волны с частотой среды; поглощение электромагнитных волн телом человека достигает

наибольшей величины, т.е. резонанса, при значениях частот (в МГц-диапазоне), соответствующих порядку $114/L$, где L – высота человека в метрах.

Удельная поглощенная энергия – энергия, поглощенная в единице массы (SA), выражается в джоулях на килограмм; удельная поглощенная энергия представляет собой интеграл по времени от удельной поглощенной мощности.

Удельная поглощенная мощность, SAR – скорость, с которой энергия поглощается в тканях тела, выражается в ваттах на килограмм (Вт кг^{-1}); SAR является дозиметрической величиной, которая широко применяется при частотах выше 100 кГц.

Частота – число синусоидальных циклов, совершаемых электромагнитными волнами за 1 с, обычно выражается в герцах (Гц)

Электромагнитная энергия – энергия электромагнитного поля, выражается в джоулях (Дж).

Электропроводность – скалярная или векторная величина, равная отношению плотности тока проводимости к напряженности электрического поля и обратная удельному электрическому сопротивлению. В системе СИ выражается в сименсах на метр (См м^{-1}).

ЭМП – электрические, магнитные и электромагнитные поля.