

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭКОЛОГИИ

СУВОРОВ Н. Б.

Отдел экологической физиологии,

*ГУ «Научно-исследовательский институт экспериментальной медицины СЗО РАМН»,
Санкт-Петербург*

Суворов Н. Б. Медико-биологические аспекты электромагнитной экологии // Мед. акад. журн. 2010. Т. 10. № 4. С. 191–200. ГУ «Научно-исследовательский институт экспериментальной медицины СЗО РАМН», Санкт-Петербург, 197376, ул. Академика Павлова, 12.

В статье анализируются основополагающие результаты исследований биологической эффективности электромагнитных полей и сверхширокополосных импульсных излучений. Обсуждается роль различных режимов облучения и биотропных параметров в реализации биологических эффектов. Затрагиваются вопросы медицинского применения электромагнитных излучений.

Ключевые слова: электромагнитные поля, биотропные параметры, биоэффекты.

Suvorov N. B. Medical and biologic aspects of electromagnetic ecology // Med. Acad. Journ. 2010. Vol. 10. № 4. P. 191–200. Institute of Experimental Medicine of the RAMS. St. Petersburg, 197376.

The fundamental results of researches of biological efficiency of electromagnetic fields (EMF) and ultra wide band pulse radiations are analyzed in the article. The role of various modes of an irradiation and biotropic parameters in realization of biological effects is discussed. Some questions of EMF medical application are mentioned.

Keywords: electromagnetic fields, biotropic parameters, bioeffects.

Для корреспонденции: Суворов Николай Борисович, д-р биол. наук, проф., зав. лабораторией нейроэкологии Отдела экологической физиологии НИИЭМ СЗО РАМН; тел. служ.: (812) 2340925, моб. +7 9119963466, E-mail: nbsuvorov@yandex.ru

Отечественная электромагнитобиология как самостоятельное научное направление сформировалась, вероятно, в 1930-е гг. Несколько научных центров занимались изучением биологического действия ультракоротких электромагнитных излучений (УКВ). Теоретический уровень исследований был весьма высок. Так, Фролов П. Ф. [1] отмечал, что влияние УКВ-излучений на физиологические процессы зависит от «физической характеристики действующей энергии (длина волны, сила и продолжительность действия, условия применения), ... от биологических особенностей изучаемого объекта (вид животного, величина тела, пол, возраст, здоровое или патологическое состояние и т. д.)». В настоящее время к биотропным параметрам добавились: глубина проникновения, вид модуляции, локализация, ориентация объекта относительно векторов E и H и др. Автор пишет о «бионегативном» действии УКВ сильных термогенных доз (длины волн, оптимальных для нагревания: сыворотки крови – 99 см, спинномозговой жидкости – 9 см, крови – 2.62 м, кожи – 5.48 м) и о «биопозитивном» действии малых доз, которые «стимулируют живые клетки – возбуждают их жизнедеятельность». С современных позиций малые дозы электромагнитных излучений (ЭМИ) могут быть как вредными, при длительном или хроническом действии приводящими к патологическим изменениям, так и полезными

и широко применяются в медицине. Очевидно, некоторые из приведенных цифр в настоящее время пересмотрены в связи с расширением исследований в сверхвысокочастотную (СВЧ) область.

Одним из первых отечественных обзоров следует считать работу Глезера Д.Я. [2], в которой автор, анализируя данные 131 отечественной и зарубежной публикации и свои собственные результаты, приходит к ряду выводов, не противоречащих современным данным. Он решительно отвергает наличие каких-либо фантастических свойств в отношении биологического действия ЭМИ, отводя нервной системе первостепенную роль в реализации биоэффектов и предполагая, что электромагнитное поле (ЭМП) «способно создать достаточный температурный градиент на мембранах микроскопического и макроскопического порядка». Стандартные диапазоны электромагнитных волн представлены в табл. 1.

Ограничимся анализом медико-биологических эффектов УВЧ, СВЧ и КВЧ диапазонов. Анализ опыта современных научных школ [3–6], работающих в этих диапазонах действия ЭМИ на живые системы, приводит к выводу: их частотные характеристики заметно влияют на функциональную зависимость между плотностью потока энергии (ППЭ) и временем облучения. Биологическая активность, зависимость между глубиной проникновения излучения и выра-

Таблица 1

Международная классификация электромагнитных волн по частотам

Частотный диапазон	Границы диапазона	Наименование волнового диапазона
Крайние низкие, КНЧ	3–30 Гц	Декамегаметровые 100–10 Мм
Сверхнизкие, СНЧ	30–300 Гц	Мегаметровые 10–1 Мм
Инфранизкие, ИНЧ	0,3–30 кГц	Гектокилометровые 1000–10 км
Низкие частоты, НЧ	30–300 кГц	Километровые 10–1 км
Средние частоты, СЧ	0,3–3 МГц	Гектометровые 1–0,1 км
Высокие частоты, ВЧ	3–30 МГц	Декаметровые 100–10 м
Очень высокие, ОВЧ	30–300 МГц	Метровые 10–1 м
Ультравысокие, УВЧ	0,3–3 ГГц	Дециметровые 1–0,1 м
Сверхвысокие, СВЧ	3–30 ГГц	Сантиметровые 10–1 см
Крайне высокие, КВЧ	30–300 ГГц	Миллиметровые 10–1 мм
Гипервысокие, ГВЧ	300–3000 ГГц	Децимиллиметровые 1–0,1 мм

женностью эффекта на организменном уровне различны для разных диапазонов частот (табл. 2 и 3).

Приведенные в таблицах количественные данные о некоторых свойствах живых систем под влиянием ЭМП свидетельствуют о том, что даже незначительное изменение параметров действующего излучения требует проведения специальных исследований с учетом насыщенности биоткани водой.

Доказано, что при электромагнитном облучении внутри организма образуются интерференционные максимумы поглощения – «горячие точки». Для человека локальные максимумы, располагающиеся, как правило, внутри головы, возникают при облучении в диапазоне 750–2500 МГц. Максимум, обусловленный «резонансом» с общими размерами тела, находится в диапазоне 50–100 МГц. Отмечены также функциональная зависимость между соотношением скорости повреждения, восстановительных реакций и плотностью потока энергии. Определена функциональная зависимость коэффициента кумуляции от экспозиции и ППЭ облучения. Величина летального градиента температуры не зависит от вида животных, а время достижения этого градиента обратно пропорционально весу биообъекта. Величина поглощенной мощности зависит от формы и ориентации объекта относительно векторов ЭМП. Поглощение максимально, когда вектор напряженности электри-

ческого поля E параллелен длинной оси тела. Недостатком многих публикаций по биоэффектам ЭМИ является отсутствие принципиальных и необходимых для воспроизведения сведений: подробных и точных метрологических характеристик применяемого фактора, условий облучения, наличие или отсутствие контрольных групп и др.

В свое время Delgado [7] высказал мысль об электромагнитном «засорении» мозга, подчеркнув ведущую роль центральной нервной системы (ЦНС) в реакциях на электромагнитные поля. В исследованиях влияния ЭМИ СВЧ-диапазона на ЦНС человека и животных выяснилось, что некоторые результаты носили противоречивый характер, объясняющийся множеством биотропных параметров воздействия, учет совокупности которых не всегда представлялся возможным. В особенности это относилось к исследованиям спонтанной и вызванной биоэлектрической активности головного мозга, поведению. Различие в биоэффектах нетермогенных СВЧ-излучений непрерывной и импульсной генерации на поведение было незначительным, длительное действие импульсно-модулированных полей на биоэлектрическую активность головного мозга приводило к нежелательным сдвигам, включая морфологические эффекты. Очевидно, что надежное определение состояния ЦНС возможно только при комплексном подходе, сочетающем электрофизиологические, поведенческие, нейрохимические и другие методы. С учетом сложности и противоречивости оценок реакций организма на электромагнитные факторы среды следует признать, что перенос данных, полученных в эксперименте, на человека методами классической радиобиологии представляется возможным, но требует осторожности.

В исследовательских целях такие биотропные параметры электромагнитного поля, как напряженность, плотность потока энергии, глубина проникновения и особенно удельная поглощенная мощность (УПМ), определяются на тушках животных или фантомах, приближенных по форме к конкретному биообъекту и изготовленных из пластмасс с соответствующими электрофизическими свойствами. Результаты таких измерений имеют относительный характер, поскольку не учитывается целый ряд специфических особенностей, присущих только живым системам (движение биологических жидкостей, наличие системы терморегуляции, различное функциональное состояние и т. д.). Тем не менее УПМ является в настоящее время одним из ведущих показателей, поскольку характеризует энергетический эффект взаимодействия организма с ЭМИ.

Для биологических объектов (70–90% воды) $УПМ = 4200 \times \Delta T / \Delta t$ Вт/кг, где 4200 Дж/кг \times град – теплоемкость воды. 20 эмбрионов японского пе-

Таблица 2

Электрические свойства биосубстрата и параметры электромагнитного поля в тканях с низким содержанием воды

Частота, Гц F	Длина волны в воздухе, см λ_0	Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ	Проводимость * 10^{-3} Ом*м σ	Коэффициент экранирования внешнего поля $K_{Экр}$	Длина волны в ткани, см λ_{TK}	Глубина проникновения, см d
$2.7 \cdot 10^7$	1106	20	27	27	241	159
$4 \cdot 10^7$	750	14.6	33	19	187	118
10^8	300	7.45	47.5	10	106	60.4
$3 \cdot 10^8$	100	5.7	69.5	7	41	32.1
$4.33 \cdot 10^8$	69.3	5.6	78	6.4	28.8	26.2
$7.5 \cdot 10^8$	40	5.6	94	6	16.8	23
$9.15 \cdot 10^8$	32.8	5.6	101	5.9	13.7	17.7
$1.5 \cdot 10^9$	20	5.6	121	5.8	8.41	13.9
$2.45 \cdot 10^9$	12.2	5.5	154	5.7	5.21	11.2
$3 \cdot 10^9$	10	5.5	172	5.6	4.25	9.74
$5 \cdot 10^9$	6	5.5	236	5.6	2.63	6.67
$5.8 \cdot 10^9$	5.17	5.05	262	5.1	2.29	5.24
$8 \cdot 10^9$	3.75	4.7	343	4.8	1.73	4.61
10^{10}	3	4.5	436	4.6	1.41	3.39

Таблица 3

Электрические свойства биосубстрата и параметры электромагнитного поля в тканях с высоким содержанием воды

Частота, Гц F	Длина волны в воздухе, см λ_0	Относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ	Проводимость 1/Ом*м σ	Коэффициент экранирования внешнего поля $K_{Экр}$	Длина волны в ткани, см λ_{TK}	Глубина проникновения, см d
10	$3 \cdot 10^9$	10^7	0.104	$1.9 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^4$
100	$3 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^5$	0.112	$4 \cdot 10^7$	$0.91 \cdot 10^5$	$1.54 \cdot 10^4$
1000	$3 \cdot 10^7$	$1.3 \cdot 10^5$	0.125	$2.3 \cdot 10^6$	$0.276 \cdot 10^5$	$0.46 \cdot 10^4$
10^4	$3 \cdot 10^6$	$6 \cdot 10^4$	0.131	$2.4 \cdot 10^5$	$7.7 \cdot 10^3$	$1.58 \cdot 10^3$
10^5	$3 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^4$	0.192	$4 \cdot 10^4$	1730	475
10^6	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$	0.4	$7.5 \cdot 10^3$	436	91.3
10^7	$3 \cdot 10^3$	160	0.625	$1.13 \cdot 10^3$	118	21.6
$2.7 \cdot 10^7$	1106	113	0.612	420	68.1	14.3
$4 \cdot 10^7$	750	97	0.69	320	51.3	11.2
10^8	300	71.7	0.89	175	27	6.7
$3 \cdot 10^8$	100	54	1.37	98	11.9	3.9
$4.33 \cdot 10^8$	69.3	53	1.43	78	8.76	3.57
$7.5 \cdot 10^8$	40	52	1.54	64	5.34	3.18
$9.15 \cdot 10^8$	32.8	51	1.6	60	4.46	3.04
$1.5 \cdot 10^9$	20	49	1.77	54	2.81	2.42
$2.45 \cdot 10^9$	12.2	47	2.21	50	1.76	1.7
$3 \cdot 10^9$	10	46	2.26	48	1.45	1.61
$5 \cdot 10^9$	6	44	3.92	46	0.89	0.788
$8 \cdot 10^9$	3.75	40	7.65	44	0.578	0.413
10^{10}	3	39.9	10.3	43	0.464	0.343
$9 \cdot 10^{10}$	0.33	15	50	18	0.082	0.043

репела через сутки после начала инкубации облучали 2450 МГц непрерывной генерации в течение 24 ч с ППЭ 30 мВт/см². Длинную ось яйца располагали параллельно вектору E, так как в этом случае поглощение максимальное. Удельная поглощенная мощность составила 14 мВт/г. Метрологическая ценность определения УПМ подтверждена исследованиями многих авторов, которые стали классическими.

Высокая вариабельность поглощения выявлена на фантоме человека в диапазоне 50–800 МГц. При резонансе и при ППЭ=1 мВт/см² УПМ достигала 0.36 Вт/кг. Максимальная УПМ локализована в области шеи. Термограммы доказали наличие индивидуальных резонансных частот для различных частей тела (шея, голова, руки, ноги). Именно резонансные явления на теле представляют наибольшую опасность. По другим данным, облучение частотой

350 МГц приводит к неравномерному поглощению энергии и градиент локальной УПМ может достигать 8 Вт/кг.

Guy, Chou [8] определили, что вызывающее нагрев облучение 915 МГц мозга крыс импульсами от 1 мкс до 360 мс мощностью 2–10 кВт повышало температуру на 8° , вызывало судороги, при этом УПМ достигала 40 000 Вт/кг.

Поглощение энергии тушками крыс при облучении СВЧ исследовалось D'Andrea et al. [9]. Определяли УПМ для разных сегментов тела. Максимум средней УПМ приходится на 700 МГц. Максимумы локальной УПМ распределились следующим образом: 360 МГц – прямая кишка, 700 МГц – толстая кишка, 915 МГц – пищевод, 2450 МГц – головной мозг. Пороговые значения физиологических и поведенческих реакций на воздействие частоты 2450 МГц для крыс: ППЭ – 0.5–2.5 мВт/см² с УПМ 0.14–0.7 Вт/кг; для кроликов: ППЭ – 0.5–5 мВт/см² с УПМ 0.075–0.75 Вт/кг. Результаты подчеркивают многообразие биоэффектов ЭМИ, но не исчерпывают всего спектра частот, интенсивностей, модуляций и т. д.

Важные данные с точки зрения понимания различия между непрерывным и импульсно-модулированным режимами генерации получили Kues et al. [10]. Приведенная к 1 мВт/см² УПМ составляла 0.26 Вт/кг и для импульсного и для непрерывного облучения. Тем не менее длительное действие импульсного облучения оказывало большее повреждающее действие на биологический объект в целом и его отдельные системы, нежели непрерывное. Этот факт не был опровергнут и в последующие годы.

Многолетние исследования убедительно свидетельствуют о том, что поглощение электромагнитной энергии живыми системами имеет нелинейный, резко неравномерный характер, характеризующийся наличием «горячих точек». Существует множество гипотез о причинах этого эффекта. Одна из них заслуживает быть упомянутой. Эксперименты проводились на модельных мембранах [11]. Скачкообразный СВЧ-нагрев мембраны, сформированной на отверстии в тонкой диэлектрической перегородке, до 10°C приводил к нагреву электролита за 1–3-секундную экспозицию на 0.2°C (частота облучения 1000 МГц). При использовании частоты 300 МГц нагрев электролита лежал в пределах сотых долей градуса. Существенно, что в диапазоне частот 300–2500 МГц величина эффекта примерно обратно пропорциональна частоте. Феномен наблюдался при поляризации вектора E перпендикулярно плоскости мембраны. Известно, что температурные сдвиги в головном мозге, локальные в том числе, являются сильным раздражителем.

Для определения распределения «горячих точек» приемлемы термографические методы или ядерно-

магнитно-резонансная томография. Кроме того, применяются термометрические датчики, фиброэластичные термометры, датчики электрического поля. В любом случае рекомендуется использование нескольких методик (одновременно или последовательно), что повышает достоверность проводимых измерений. Таким образом, методы неинвазивного определения УПМ у человека существуют и совершенствуются.

Развитие работ в этом направлении обусловлено необходимостью гигиенического нормирования и радиологической защиты. Очевидно, как в настоящее время, так и в ближайшем будущем ожидается лишь нарастание интенсивности антропогенных электромагнитных полей и расширение контингента лиц, подвергающихся облучению в окружающей среде и в процессе специфической производственной деятельности. Результаты проведенных гигиенических исследований таковы: в диапазоне 30 МГц–300 ГГц выделяется тепловое (10 мВт/см² и выше) и нетепловое (ниже 10 мВт/см²) действие ЭМИ. Радиолокационные станции, работающие в диапазоне частот 300 МГц–37.5 ГГц в импульсном режиме с частотой следования до 1000 имп/с, создают на рабочих местах ППЭ до 10 мкВт/см², а на открытой территории – до 3700 мкВт/см², в зависимости от высоты и угла наклона антенн. Энергетическая нагрузка на технический персонал аэропортов достигает 563.5–5740 мкВт×ч/см² без учета индивидуальных средств защиты. Энергетическая нагрузка на лиц, не связанных с обслуживанием радиосистем, составила 1672.6 мкВт×ч/см².

Другой подход к проблеме опирается на следующие критерии: катарактогенный эффект, уменьшение времени жизни, нарушение теплового баланса, летальные эффекты – могут основываться на экспериментальных данных. Для человека в условиях профессиональной деятельности критерии другие: работоспособность (производительность труда), соматическое здоровье, генетические последствия. УПМ для профессионалов предполагается 0.4 Вт/кг в течение 1 ч экспозиции. При этом абсолютно необходимы учет режимов облучения и времени воздействия. Особенно важна оценка спектра модулированных ЭМИ, особенно в низкочастотной области, поскольку именно в этих диапазонах, включая декасекундные, разворачивается цепочка управляющих сигналов в центральной нервной системе. По характеру модуляции выделяются самостоятельные группы ЭМИ с линейной и круговой поляризацией. При дальнейшем развитии такой концепции предельно допустимые уровни (ПДУ) приобретут признаки многофакторных функций частоты, экспозиции, режимов модуляции. В конечном итоге регламентация ЭМИ превратится в систему управления.

В России диапазон интенсивностей ЭМИ разделен на 3 зоны: подпороговая зона, зона адаптивного восприятия, зона поражения. Исходя из принципов гигиенической регламентации, порог вредного воздействия лежит на границе адаптационных реакций и поражения [12]. В гигиенической практике СССР принято международное деление ЭМИ на нормируемые диапазоны (табл. 1). Для каждого из них определены собственные ПДУ. В диапазоне 300 МГц–300 ГГц регламентируются: предельно допустимый уровень плотности потока энергии ППЭпд и энергетическая экспозиция (ЭЭпд) – произведение ППЭ на время его действия T : $ЭЭпд = ППЭпд \times T$. Энергетическая экспозиция за рабочий день, кроме облучения от сканирующих и вращающихся антенн, не должна превышать 200 мкВт×ч/см². В последнем случае в расчеты вводятся поправочные коэффициенты, зависящие от скважности, т. е. $ППЭпд = K \times ЭЭпд / T$, где K – коэффициент ослабления биологической эффективности. $K = 1$ – для непрерывных режимов генерации; $K = 10$ – для облучения от вращающихся и сканирующих антенн с частотой не более 1 Гц и скважностью не менее 50; $K = 12.5$ – для случаев локального облучения кистей рук. При воздействии ЭМИ на руки $ЭЭпд = 2500$ мкВт×ч/см²; при времени воздействия меньше 12 мин $ППЭпд = 5000$ мкВт/см²; но при этом ППЭ, действующей на другие части тела, не должна превышать 10 мкВт/см². Для модулированных ЭМИ нормируемым параметром является среднеквадратичное значение ППЭ.

На протяжении ряда лет Отдел экологической физиологии НИИЭМ РАМН участвовал в советско-американском сотрудничестве в области электромагнитобиологии. Были опубликованы результаты параллельных дублирующих экспериментов [13]. В исследованиях использовалась частота 2450 МГц. Изучались биохимические, поведенческие, электрофизиологические показатели во время и сразу после воздействия. Несколько групп крыс облучались в непрерывном режиме генерации с ППЭ 10 мВт/см² в течение 7 ч. Влияния на поведение в открытом поле не обнаружено. Однако некоторые элементы

поведения в облучаемой и контрольной группах отличались. Кроме того, обнаружены значительное уменьшение АТФ-азной активности и различия в результатах электрофизиологического анализа.

В комплексных исследованиях авторы [14] использовали длительное (160–200 ч) с многими контролями облучение кошек и крыс частотой 2375 МГц и ППЭ 500 мкВт/см². Изучались: многоканальная медленная и мультиклеточная биоэлектрическая активность, оценивалось межструктурное взаимодействие; поведенческие реакции крыс в «открытом поле» с предварительным разделением их по особенностям поведения на три индивидуально-типологические группы; инструментальный пищевой рефлекс у крыс; физическая работоспособность крыс; избирательность поражения структур мозга на основании морфологических данных. В результате удалось научно обосновать комплекс чувствительных к ЭМИ структур мозга: гипоталамус, срединный центр таламуса, гиппокамп, сенсомоторная кора. При облучении происходит их активация и усиление взаимодействия между ними. Происходит постепенное функциональное разобщение исследуемых структур при одновременном усилении внутрискатурного взаимодействия в гипоталамусе, срединном центре таламуса, сенсомоторной коре. Идентифицировано три вида повреждений нейронов: хроматолиз, сморщивание и ишемические изменения. Исследования ультраструктуры латерального гипоталамического поля выявили деструктивные изменения аксондентрических синапсов – концентрацию синаптических везикул в центре пресинаптического отдела. Указанным синапсам принадлежит ведущая роль в обеспечении морфологических связей между зонами мозга. Через 6 мес после отмены облучения наблюдались признаки восстановления ультраструктуры, т. е. имело место начало компенсаторно-восстановительного процесса.

В экспериментах на куриных эмбрионах получена кривая УПМ в каждый из 20 дней инкубации (табл. 4).

Таблица 4

Удельное поглощение электромагнитной энергии (мВт/г) и относительное содержание воды в курином эмбрионе по дням инкубации

Дни инкубации	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Удельная поглощенная мощность	0.22 ±.005	0.222 ±.006	0.22 ±.004	0.23 ±.01	0.24 ±.011	0.25 ±.013	0.254 ±.014	0.26 ±.017	0.314 ±.02	0.292 ±.016
Содержание воды, отн. единицы	1.25 ±.062	1.24 ±.061	1.26 ±.063	1.24 ±.065	1.31 ±.067	1.35 ±.071	1.37 ±.07	1.38 ±.069	1.45 ±.072	1.79 ±.071
Дни инкубации	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Удельная поглощенная мощность	0.268 ±.017	0.22 ±.012	0.27 ±.015	0.23 ±.013	0.24 ±.014	0.292 ±.017	0.22 ±.008	0.362 ±.019	0.26 ±.015	0.28 ±.018
Содержание воды, отн. единицы	1.87 ±.075	2.71 ±.08	2.83 ±.084	2.54 ±.082	2.86 ±.085	3.04 ±.091	3.24 ±.095	2.09 ±.08	2.89 ±.085	3.02 ±.09

УПМ имеет неравномерный характер, слабо коррелирует с относительным содержанием воды в объекте, пики и спады совпадают с критическими фазами морфофункционального созревания эмбриона. В основе функционального разобщения мозговых образований лежат разнообразные повреждения нейронов и аксодендритических синапсов, при которых нарушается проведение возбуждения между структурами головного мозга. Известно, что синаптические контакты нейронов в рефлекторной дуге являются наиболее уязвимым звеном при воздействии ЭМИ.

В упомянутой советско-американской программе исследовались нервные проявления влияния ЭМИ на человека [15, 16]. Было обследовано две группы лиц, имевших профессиональный контакт с полями микроволнового и радиодиапазонов. Первую группу составили женщины до 40 лет, работавшие с ЭМИ длиной волны до 1 м с воздействием преимущественно на руки, ППЭ на рабочих местах – 15–400 мкВт/см². Предельная энергетическая экспозиция достигала 1600 мкВт×ч/см². Системный анализ вегетативных, клинических и ЭЭГ-показателей выявил тесную связь части физиологических параметров с увеличением стажа работы: рост бета-индекса ЭЭГ, неустойчивость альфа-ритма, рост периферического сопротивления сосудов, тенденция к росту диастолического давления, снижение температуры и теплоотдачи обеих рук и др. Число жалоб (головные боли, раздражительность, утомляемость, нарушение сна и др.) при стаже свыше 14 лет в сравнении с контрольной группой повышалось в 2.6 раза. Очевидно, имеет место кумуляция биоэффектов микроволн, приводящая к истощению функциональных резервов ЦНС при стаже более 14 лет, который авторы признали предельным для условий данного производства.

В другой серии обследовалась группа мужчин – регулировщиков радиопередающих устройств 3–30 МГц. Облучение на рабочих местах общее. Напряженность амплитудно-модулированного поля – до десятков В/м. Энергетическая нагрузка не превышала 7200 (В/м)²×ч. В контрольной группе, соответствующей по численности, возрасту и стажу работы основной, не имели жалоб 75% испытуемых. В основной группе эта цифра – 37.5%. Исследование пространственно-дискретной структуры ЭЭГ показало выпадение связей, носящее последовательный характер и приводящее к частичному функциональному разобщению лобно-теменных отделов мозга и исчезновению некоторых циклических составляющих межцентрального взаимодействия. Оценка межполушарного баланса дала основания для вывода о том, что с увеличением стажа нарастает истощение функциональных резервов головного мозга. Подавление циклических интракортикальных взаимодействий и функциональное разобщение структур мозга

лежат в основе субклинической дизэнцефальной патологии и общей астенизации организма.

Наличие комплекса неспецифических клинических синдромов при хроническом действии ЭМИ дало основание поддержать понятие «радиоволновая болезнь» в качестве самостоятельной нозологической единицы, где преобладают неспецифические компоненты. При длительном (кумулятивном) действии ЭМИ формируется состояние неспецифической предпатологии, которое при отсутствии медицинского контроля может развиваться в самую неожиданную сторону.

Активационное действие электромагнитных полей разных диапазонов используется в медицинской практике. Благодаря ранее проведенным и продолжающимся фундаментальным исследованиям, к настоящему времени разработано огромное количество физиотерапевтических приборов, использующих положительные биологические эффекты ЭМИ.

Специфический интерес представляет изучение биологического действия импульсных излучений сверхширокополосного диапазона СШП (Ultra Wide Band Radiation), представляющих относительно новый экологический фактор риска [17]. Хорошо известно, что ширина полосы частот определяет информативность радиотехнических систем. Отличием СШП-систем связи от традиционных является отсутствие несущей частоты. Для передачи информации в СШП используются сигналы с очень короткой длительностью, так называемые «гауссовские» импульсы. Длительность импульсов находится в диапазоне от 0.1 до 1.5 нс (наносекунд).

Поиски путей повышения информационных возможностей определили быстрое развитие технологий, использующих сверхширокополосные сигналы. По определению, к сверхширокополосным относятся сигналы, удовлетворяющие условию $0,25 < h < 1$, где

$$h = (f_{\text{верх}} - f_{\text{ниж}}) / (f_{\text{верх}} + f_{\text{ниж}}).$$

Поскольку СШП-системы занимают весьма широкие полосы частот, существует проблема их биологической безопасности и электромагнитной совместимости с традиционными узкополосными системами, действующими в том же спектральном диапазоне.

Радиолокационные системы с полосой частот, не превышающей 10% от несущей, не позволяют получить образ цели. Переход к СШП-радарам дает возможность увеличить количество информации о цели и получить ее радиоизображение. Так, при уменьшении длительности излучаемого импульса с 1 мкс до 1 нс (в тысячу раз) глубина импульсного объема радара уменьшается с 300 м до 30 см. Исследующий пространство инструмент становится значительно более чувствительным и приобретает ряд новых ка-

чества, из которых ценными для медико-биологического использования являются:

- повышение устойчивости радара к воздействию всех видов пассивных помех – дождя, тумана, подстилающей поверхности, аэрозолей, металлизированных полос и т.п.;
- повышение вероятности обнаружения и устойчивость сопровождения «цели».

Применение СШП-сигналов – самостоятельное научно-техническое направление с собственными методами теоретического анализа и схемотехническими решениями. Сегодня в ведущих странах в области разработок СШП-аппаратуры различного назначения сосредоточены большие ресурсы. Мы являемся свидетелями незримой гонки в области СШП-технологий. Выигравший эту гонку реально повысит свои информационные возможности, в том числе в целях бесконтактной регистрации биологических сигналов.

Аппаратура, генерирующая наносекундные импульсы, создана около 40 лет назад, и полный анализ биоэффектов таких воздействий только предстоит провести. Имеющиеся публикации чаще посвящены анализу воздействий СШП-устройств на электронно-информационные системы. Поскольку системы связи, обнаружения, противодействия с использованием СШП-аппаратуры интенсивно развиваются, эксперты обоснованно высказывают мнение относительно безопасности этих систем – пиковая мощность достигает очень больших величин. Из-за отсутствия полных и надежных данных о биоэффектах СШП-излучений не существует регламентирующих санитарно-гигиенических документов.

Данные о серьезных биоэффектах СШП-излучений большой пиковой и низкой средней напряженности приводятся относительно нечасто. Это обусловлено редкими возможностями проведения исследований их влияния на человека. Лишь незначительное количество результатов свидетельствует об опасном характере биологического влияния редких импульсов, коротких, «залповых» воздействий высокой пиковой мощности, не приводящих, однако, к нагреванию объекта [18]. Воздействие СШП-импульсов вызывает слуховые галлюцинации, при повышении мощности может парализоваться слух, у крыс наблюдали снижение артериального давления, нагрев тканей может происходить при 100 Дж/см². Петровой Е.В. и соавт. [19] описано изменение спектрального состава электрической активности коры больших полушарий крыс по сравнению с контролем. В частности, происходило подавление частот, близких к частоте следования СШП-импульсов, а также снижение межполушарной когерентности. 22-часовая непрерывная регистрация полисомнограммы у кроликов после облучения выявила «отставленный»

эффект – значительное увеличение парадоксального сна. Авторы предположили непосредственное действие излучения на механизм генерации тета-ритма и на систему циркадной ритмики.

Некоторые авторы считают, что СШП-облучение вызывает адапционные реакции, поскольку не выявлено отрицательных побочных эффектов. Противоречивые или несовпадающие результаты в электромагнитной экологии встречаются часто, так как этому могут способствовать даже незначительные изменения в методике, метрологии и условиях проведения экспериментов.

Применение короткоимпульсной техники в медицинских целях пока имеет ограниченный характер. СШП-локаторы могут быть использованы практически всюду, где требуется высокая точность дистанционного наблюдения за движущимися объектами на небольших расстояниях: на автотранспорте – для предотвращения столкновений при движении и парковке; в качестве датчиков охранной сигнализации для обнаружения несанкционированного проникновения на охраняемую территорию; для обнаружения людей (по их движениям) под завалами строительных конструкций или снежными лавинами, а при их неподвижности – по сокращениям сердца и движениям грудной клетки; в клиниках или в домашних условиях – для дистанционного измерения параметров сердечной и дыхательной деятельности человека.

Весьма полезным для медицинского использования оказался бесконтактный метод измерения частоты дыхания и сердечных сокращений человека (рис. 1, 2), основанный на определении ускорения движения сердца и грудной клетки человека [20].

Подробности о состоянии вопроса опубликованы на сайтах [21, 22]. Одной из важных проблем медицины является сохранение и восстановление высокой

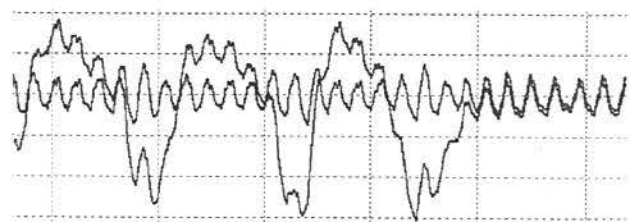


Рис. 1. Оциллограмма суперпозиции сигналов дыхания и сердца

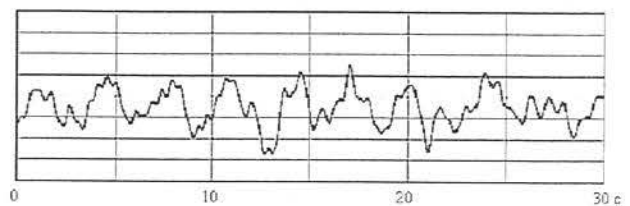


Рис. 2. Оциллограмма сигнала, отраженного от спокойно дышащего человека

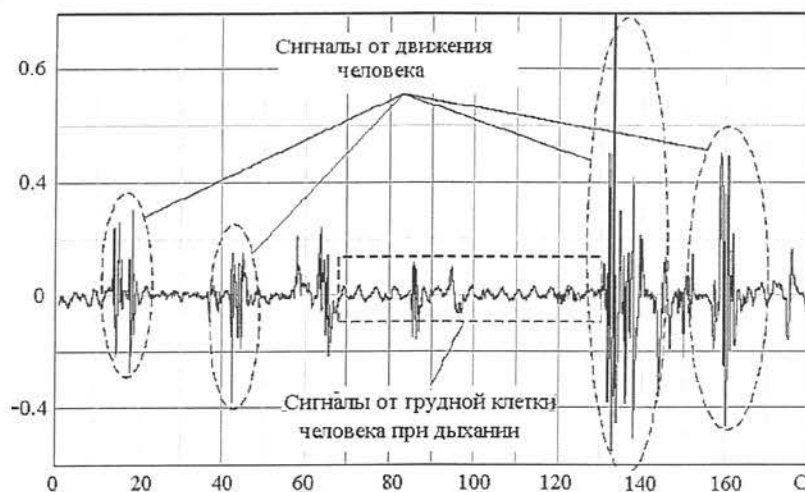


Рис. 3. Сигнал радара при регистрации движений человека за препятствием

работоспособности человека в системе управления. Бесконтактный мониторинг состояния человека необходим и в целом ряде медицинских диагностических задач. Сверхширокополосный радар позволяет получить исходную информацию о деятельности сердца и дыхании на расстоянии до 10 м.

В медицине катастроф актуальным является поиск людей среди развалин и разрушений. СШП-радары позволяют обнаруживать неподвижных живых людей за оптически непрозрачными преградами (рис. 3). Малая длительность сигнала обеспечивает высокую точность определения местоположения человека за преградой. В основе метода лежит способность электромагнитных волн частично отражаться от раздела двух сред и проникать сквозь среду. Выбранный сверхширокополосный сигнал позволяет:

- уменьшить спектральную плотность мощности излучаемого сигнала, что значительно снижает уровень электромагнитного излучения, действующего на персонал;
- уменьшить минимальное расстояние, на котором производятся измерения;
- уменьшить габариты прибора;
- уменьшить минимальное расстояние, на котором производятся измерения;
- уменьшить габариты прибора;
- увеличить защиту прибора от помех и повысить достоверность измерений.

Не претендующее на полноту обобщение сведений относительно биологического действия электромагнитных полей диапазонов 300–3000 МГц и СШП-излучений позволяет сформулировать ряд общих положений:

1. По мере углубления знаний о биофизических механизмах биоэлектромагнитного взаимодействия, в силу биологической неиндифферентности по отношению к любым уровням организации живых

систем, из-за постоянно расширяющегося диапазона длин волн вновь создаваемой аппаратуры, ЭМИ нуждаются в периодическом (по мере получения новых знаний) гигиеническом нормировании.

2. Считается доказанным, что биоэффекты ЭМИ разных интенсивностей (термогенных, слабых и сверхслабых) реализуются посредством различных механизмов и способны накапливаться (кумулятивный эффект) при повторных, длительных и хронических экспозициях. Электромагнитные поля могут изменять поведение, условнорефлекторную деятельность, память, ультраструктуру нервных клеток, генетические особенности, биоритмологическую организацию нервно-системных процессов, вызывая подавление циклических форм физиологической активности и задержку их формирования. С увеличением времени контакта или профессионального стажа работы с неионизирующими излучениями связано снижение функциональных резервов головного мозга и организма в целом.

3. Наибольшей биологически положительной или отрицательной значимостью обладают электромагнитные излучения, совпадающие с функционально значимой фазой естественного биоритма живой системы и адекватные ей по физическим характеристикам. В литературе этому факту есть многочисленные подтверждения [23].

4. При определенных условиях свойство первичной активации физиологических функций, диа- и гипертермические режимы используются в медицинской практике.

5. ЭМИ обладают множеством биотропных параметров – частота, интенсивность (пиковая и средняя), форма и глубина модуляции, степень локальности, соотношение электрической и магнитной составляющих, длительность (однократное, кратковременное, длительное, хроническое воздействие) и др., которые

в сочетании с индивидуальными свойствами поглощения энергии, электрофизическими характеристиками биообъекта, его функциональным состоянием, разной чувствительностью методических приёмов, методов измерения и извлечения информации и, наконец, возможным субъективизмом исследователей обуславливают чрезвычайное разнообразие и противоречивость биоэффектов на молекулярном, клеточном, органном, организменном и популяционном уровнях. Изложенное диктует необходимость выполнения ряда обязательных для воспроизводимости результатов положений при планировании и проведении исследований: тщательный контроль параметров и условий облучения и других действующих факторов; использование однородных по морфофункциональному состоянию биообъектов; при проведении экспериментов на животных необходимо предварительное их разделение на индивидуально-типологические группы; подготовка и проведение адекватных контрольных измерений и исследований.

При использовании такого сложного физического воздействия как ЭМИ особенно актуальным является проведение комплексного изучения взаимосвязанных нервно-системных реакций, когда каждое следующее исследование планируется на основе предыдущего результата. В этом случае за счет координации работ, единого планирования легче обеспечить единообразие и преемственность методических и аналитических приемов, вносящих иногда субъективную оценку в понимание данных, метрологическую надежность, воспроизводимость результатов и их системное обобщение [24].

Неопределенной остается проблема индивидуального реагирования на ЭМИ – радиочувствительность человека, ее причины и механизмы.

Вышеизложенное позволяет сформулировать некоторые требования к аппаратуре, предназначенной для изучения биологического действия электромагнитных полей:

1. Генераторы должны иметь соответствующие измерительные приборы напряженности поля, плотности потока энергии сфокусированного и общего облучения. Желательно также измерение или расчет удельной поглощенной мощности.

2. Гибкое управление параметрами и режимами облучения: непрерывная генерация, амплитудная, частотная, импульсная модуляция, одиночные импульсы регулируемой длительности, серии импульсов, модуляции биологическими ритмами.

3. Управление параметрами и режимами облучения от биологического объекта, в этом случае биообъект изменением своего состояния адекватным образом изменяет параметры ЭМИ – функциональное биоуправление с обратной связью.

Литература

1. Фролов П.Ф. Влияние ультракоротких волн на организм животных и человека // Ультракороткие волны в медицине и биологии / Госмедиздат УССР. 1936. С. 37–61.
2. Глезер Д.Я. Ультракороткие волны и их действие на органы кровообращения // Известия научного института им. П.Ф. Лесгафта. 1940. Т. XXII. С. 5–146.
3. Антипов В.В., Давыдов Б.И., Тихончук В.С. Биологическое действие электромагнитных излучений микроволнового диапазона // Проблемы космической биологии. М.: Наука, 1980. Т. 40. 221 с.
4. Pakhomov A., Mathur S., Doyle J. et al. Comparative effects of extremely high power microwaves pulses and a brief CW irradiation on pacemaker function in isolated frog heart slices // Bioelectromagnetics. 2000. № 21. P. 245–254.
5. Бецкий О.В., Кислов В.В., Лебедева Н.Н. Миллиметровые волны и живые системы. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2004. 272 с.
6. Барышев М.Г., Васильев Н.С., Куликова Н.Н. и соавт. Влияние низкочастотного электромагнитного поля на биологические системы. Ростов н/Д: изд-во ЮНЦ РАН, 2008. 288 с.
7. Delgado J.M.R. Pollution electromagnetique et ideologique du cerveau // Sante Lomme environ: Symp. Int. Luxembourg. 1988. P. 102–106.
8. Guy A.W., Chou C.-K. Effects of high-intensity microwave pulse exposure of rat brain // Radio Science. 1982. Vol. 17. № 5S. P. 169S–178S.
9. D'Andrea J.A., Emmerson R.Y., Bailey C.M. et al. Microwave radiation absorption in the rat: frequency-dependent SAR distribution in body and tail // Bioelectromagnetics. 1985. № 2. P. 189–206.
10. Kues H.A., McLeod D.S., D'Anna S.A. et al. Microwave-induced electroretinographic changes in the primate // The Bioelectromagn. Soc. 13th Annual Meeting Abstract Book. Salt Lake City. 1991. P. 53–54.
11. Акоев И.Г., Тяжелов В.В., Коломыткин О.В. и соавт. Исследование механизма действия микроволн на модельные мембранные системы // Известия АН СССР. Сер. биол. 1985. № 1. С. 41–51.
12. Савин Б.М. Современное состояние и перспективы в области гигиенического нормирования электромагнитных излучений радиочастот // Биологическое действие и гигиеническое нормирование ЭМИ КВ-диапазона. Вып. 36. М., 1988. С. 8–32.
13. Mitchell C.L., McRee D.I., Peterson N.J. et al. Results of a United States and Soviet Union joint project on nervous system effects of microwave radiation // Environ. Health. Perspect. 1989. Vol. 81. № May. P. 201–209.
14. Суворов Н.Б., Медведева М.В., Василевский Н.Н. и соавт. Кумуляция микроволн и ее отражение в поведении, работоспособности, приросте массы тела и состоянии нейронов головного мозга // Радиобиология. 1989. Т. 29. № 5. С. 660–666.

15. Василевский Н.Н., Сидоров Ю.А., Суворов Н.Б. О роли биоритмологических процессов в механизмах адаптации и коррекции регуляторных дисфункций // Физиология человека. 1993. Т. 19. № 1. С. 91–98.
16. Суворов Н.Б., Василевский Н.Н., Никитина и соавт. Системный анализ состояния человека при длительном радиоволновом облучении // Гигиена и санитария. 1990. № 4. С. 18–21.
17. Суворов Н.Б., Белов А.В. Сверхширокополосная электромагнитная радиация – фактор риска XXI века // Вестн. Рос. ВМА. 2008. С. 186–187.
18. www.aetherwire.com/UWBWG_Archive
19. Петрова Е.В., Гуляева Н.В., Титаров С.И. и соавт. Действие импульсного сверхширокополосного электромагнитного излучения на электроэнцеф-
лограмму и сон лабораторных животных // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2003. Т. 89. № 7. С. 786–794.
20. Immoreev I., Teh-Ho Tao. UWB Radar for Patient Monitoring // IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine. 2008. Vol. 23. № 11. P. 11–18.
21. www.uwbgroup.org/rus
22. www.rslab.ru
23. Грызлова О.Ю., Субботина Т.И., Хадарцев А.А. и соавт. Биорезонансные эффекты при воздействии электромагнитных полей: физические модели и эксперимент. М.: Триада, 2007. 159 с.
24. Аносов В.Н., Трухан Э.М. Новый подход к проблеме воздействия слабых магнитных полей на живые объекты // Доклады РАН. 2003. Т. 392. № 5. С. 689–693.