

ПРИКЛАДНАЯ РАДИОФИЗИКА

УДК 537.531:57.08

НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ И ЭКОЛОГИЯ

А. М. Егоров, А. Ю. Лонин, Ю. Ф. Лонин, В. И. Чумаков, А. Г. Шепелев, О. В. Немашкало

Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт

1, ул. Академическая, Харьков, 61108, Украина

E-mail: lonin@kipt.kharkov.ua

Излагается современное состояние электромагнитной экологической обстановки, дается анализ природных и искусственных источников электромагнитного излучения (ЭМИ) и их характеристики. Рассматриваются медико-биологические, гигиенические и экологические аспекты влияния электромагнитных излучений как на человека, так и на экосистему в целом. Приводятся результаты экспериментальных исследований воздействия ЭМИ на медико-биологические объекты в Институте плазменной электроники и новых методов ускорения (ИПЭНМУ) ННЦ ХФТИ. Ил. 13. Табл. 4. Библиогр.: 45 назв.

Ключевые слова: импульсное мощное электромагнитное излучение, воздействие, медико-биологические объекты.

Бурная техногенная деятельность человека привела к появлению новых воздействующих факторов, которые влияют как на всю экосистему в целом, так и на человека, в частности. Примерами такого воздействия являются создание и испытания ядерного оружия, использование ядерной энергии в мирных целях, запуски космических аппаратов и электромагнитные поля (ЭМП) работающих технологических устройств различного назначения [1–14]. Вопросам защиты от неионизирующего электромагнитного излучения (ЭМИ) уделяется большое внимание во многих странах мира [15, 16]. Чтобы показать важность этого вопроса, приведем данные, полученные авторами из анализа 2500 работ о влиянии мощного импульсного ЭМИ и на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА) с 1970 по 2007 г., которые внесены в Международную Базу Данных (БД) МАГАТЭ «International Nuclear Information System» (INIS). Так, на рис. 1 показана динамика роста научной продукции по годам. Отметим, что к 2005 г. опубликовано около 80 научных работ.

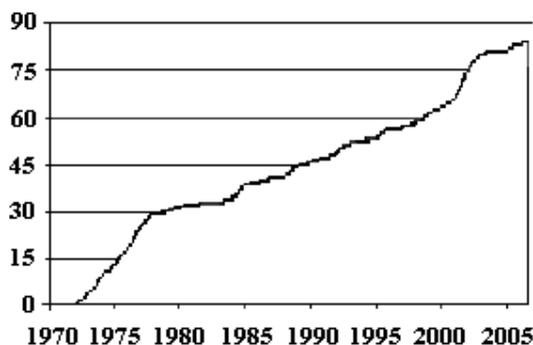


Рис. 1. Динамика роста публикаций о влиянии ЭМИ на РЭА по годам по данным БД INIS

Распределение продукции по характеру публикаций приведено на диаграмме (рис. 2), из

которой видно, что основным видом продукции является статья. Из информации, полученной по данным БД INIS за 1970–2007 гг., следует, что основным языком является английский – 82,72 %, далее идут: немецкий – 7,41 %; русский – 6,17 % и французский – 2,47 %. Представляет интерес распределение работ о влиянии ЭМИ на компоненты микроэлектроники и РЭА (рис. 3).



Рис. 2. Диаграмма распределения публикаций о влиянии ЭМИ на РЭА по данным БД INIS



Рис. 3. Распределение работ о влиянии ЭМИ на РЭА по странам из данных БД INIS

Как видно из диаграммы, основная масса работ ~ 63 % выполняется в США. Следует заметить, что Украина занимает 5-е место с ~ 4 %, однако это положение достигнуто только благо-

даря сохранению экспериментального парка и научно-технического потенциала, особенно в Харькове.

Не менее интересным представляется анализ работ о влиянии ЭМИ на медицинские и биологические объекты (БО). Так, на рис. 4 показана динамика роста научной продукции по годам (данные БД *INIS* за 1970–2007 гг.) для влияния ЭМИ на медико-биологические объекты. Видно, что к 2005 г. опубликовано 30 научных работ.

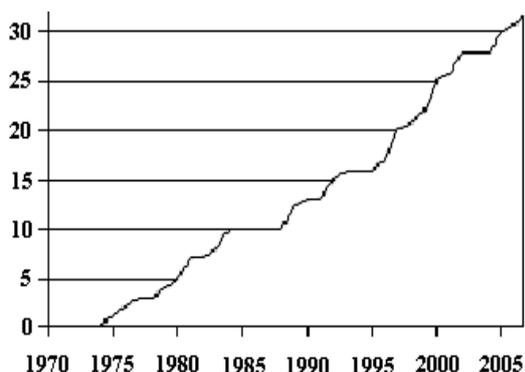


Рис. 4. Динамика роста публикаций о влиянии ЭМИ на медико-биологические объекты по данным БД *INIS*

Информация о распределении научной продукции по роду публикаций и странам представлена на рис. 5 и 6 соответственно. И в данном случае из данных БД *INIS* за 1970–2007 гг. следует, что основным языком публикаций по этим исследованиям является английский – 66,67 %, далее идет русский – 21,21 %.



Рис. 5. Диаграмма распределения публикаций о влиянии ЭМИ на медико-биологические объекты по данным БД *INIS*



Рис. 6. Распределение работ о влиянии ЭМИ на медико-биологические объекты по странам по данным БД *INIS*

1. Источники неионизирующего электромагнитного излучения. Чтобы оценить степень влияния неионизирующего электромагнитного излучения, приведем данные по природным источникам ЭМП:

- естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на ее поверхности, вследствие чего напряженность такого поля колеблется в пределах от 100 до 500 В/м, грозовые облака увеличивают эту величину до десятков-сотен киловольт на метр;

- геомагнитное поле состоит из основного (постоянного) ~ 99 % и переменного ~ 1 %, напряженность поля убывает от магнитных полюсов ~ 55,7 А/м (68,75 мкТл) к магнитному экватору ~ 33,4 А/м (41,75 мкТл), в средних широтах она составляет величину ~ 40 А/м (50 мкТл), переменная составляющая определяется процессами, протекающими в магнитосфере и ионосфере (магнитные бури), которые вызывают колебания геомагнитного поля в широком диапазоне частот от 10^{-5} до 10^2 Гц и могут приводить к многократному увеличению амплитуды;

- радиоволны, генерируемые Солнцем и галактиками, занимают область частот $10^7 \div 10^9$ Гц, в «спокойном» состоянии активность солнечного излучения находится в пределах $10^{-10} \div 10^{-8}$ Вт/м²·МГц, а во время вспышек она увеличивается в несколько десятков раз, спектр и интенсивность от галактик близки к излучению спокойного Солнца;

- человеческое тело также излучает ЭМП на частоте выше 300 ГГц, с плотностью потока мощности $P_s \approx 0,003$ Вт/м². Следует отметить, что эта составляющая постоянно растет, так как зависит от численности населения Земли и на сегодня $N \approx S \cdot P_s \approx 6 \cdot 10^9 \cdot 0,003 \approx 1,8 \cdot 10^6$ Вт (здесь S – площадь, занимаемая численностью населения).

Для сравнения в табл. 1 приведены значения ЭМП антропогенных источников ЭМИ в полосе частот $3 \cdot 10^3 \div 3 \cdot 10^{11}$ Гц без учета электромагнитного импульса, возникающего при ядерном взрыве. Об особенностях физических и технических факторов см диапазона СВЧ-излучения свидетельствует тот факт, что диапазоны 2,45; 5,8 и 24,125 ГГц (длины волн 12,2; 5,1 и 1,24 см) были выделены и теперь утверждены официальными международными ведомствами для использования в промышленных, научных и медицинских целях [17]. Более того, диапазон 2,45 ГГц (12,2 см) был еще ранее выбран применительно к разработкам по проблеме санитарно-эпидемиологической службы, поэтому вопросы по технологии, а также связанные со средой распространения уже в значительной мере исследованы. Следует отметить, что в последнее время интенсивно развиваются источники излучения в ТГц диапазоне частот [13, 14].

Поскольку наиболее мощными источниками неионизирующих ЭМИ являются экспериментальные установки релятивистской СВЧ-

электроники, рассмотрим влияние такого излучения на различные объекты.

Действие неионизирующего ЭМИ малой интенсивности на медицинские и биологические объекты. В настоящее время медико-биологические, гигиенические и экологические аспекты проблемы электромагнитных излучений приобрели особую актуальность. Это связано с тем, что в народное хозяйство активно внедряется новая тех-

ника, работающая в самых различных диапазонах частот и режимах излучения [18, 19]. Одним из основных механизмов, давно изученных и успешно используемых в различных отраслях народного хозяйства, является «тепловой механизм» [20], физический принцип которого основан на поглощении объектом (с собственными диэлектрическими и магнитными характеристиками) электромагнитной волны.

Таблица 1

Антропогенные источники ЭМП в полосе частот $1 \cdot 10^5 \div 3 \cdot 10^{11}$ Гц

Источник излучения	Частота излучения	Расстояние до точки излучения	Значение ЭМП	Мощность источника
Радиостанции НЧ	130÷285 кГц	300 м	90 В/м	1,8 МВт
Радиостанции ВЧ	415÷1606,5 кГц	50 м	450 В/м	1,8 МВт
Радиостанции КВ	3,95÷26,1 МГц	50 м 220 м	121 В/м (40 Вт/м ²) 27,5 В/м (2 Вт/м ²)	750 кВт
Ручные радиостанции типа «Уоки-токи»	27 МГц	5 см 12 см	<1000 В/м, <0,2 А/м <200 В/м, <0,1 А/м	Несколько ватт
Мобильные телефоны	20 МГц÷2 ГГц	10 см	300 В/м	
Телевизионные передатчики	47÷68 МГц 174÷230 МГц 470÷890 МГц	1,5 км	5÷20 мВт/м ²	
Радиостанции FM	87,5÷108 МГц	1,5 км	50 мВт/м ²	100 кВт
Системы охраны	0,9÷10 ГГц	В зоне действия системы	< 2 мВт/м ²	
Радиолокаторы стационарные	1÷10 ГГц	0,1÷1 км	0,1÷10 Вт/м ²	0,2÷20 кВт
Радиолокационные системы службы слежения авиатранспорта	9÷35 ГГц	3 м 10 м	< 250 мВт/м ² <10 мВт/м ²	0,5÷100 мВт
Установки СВЧ-нагрева	2,45 ГГц	5 см 1 м	10÷50 Вт/м ² < 0,25 мВт/м ²	
Экспериментальные установки релятивистской СВЧ-электроники	3 ÷ 21,6 ГГц	1 м	< 1 кВ/см	до 10 ⁹ Вт

Параметры источников ЭМП приведены по данным Международного комитета по защите от неионизирующих излучений 1996 г.

Распространение электромагнитной энергии в БО сопровождается ее поглощением и превращением в тепло. Мощность поглощения в объеме ткани выражается следующим образом:

$$P = \sigma E^2 / 2 = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 = \pi f \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \sigma E^2,$$

где σ – удельная проводимость ткани, См/м;
 $E = E_0 / \sqrt{|\varepsilon|}$ – напряженность ЭМП в ткани, В/м;
 f – частота ЭМП, Гц; $\varepsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость; $\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon''$, ε' – относительная проницаемость ткани; $\operatorname{tg} \sigma = \varepsilon''/\varepsilon'$ – тангенс угла потерь.

При этом нагрев (воздействие) может быть как объемным, так и избирательным при аномальном распределении электромагнитных

характеристик объекта, а температура может варьироваться от нескольких градусов до температур фазового перехода. Механизмы воздействия ЭМИ малой интенсивности зависят от типов объектов, их физико-химических свойств, времени экспозиции [21, 22]. Существенную роль в определении механизма и степени влияния играют характеристики ЭМИ, т. е. его частота, амплитуда, прерывность, модуляция как по частоте, так и по амплитуде [23].

В данном разделе приведены результаты влияния ЭМП малых интенсивностей на живые организмы в целом и на их функциональные системы в отдельности. Так, наиболее распространенным влиянием на человека есть воздействие ЭМП при работе с ПЭВМ, которое показано на рис. 7 и 8.

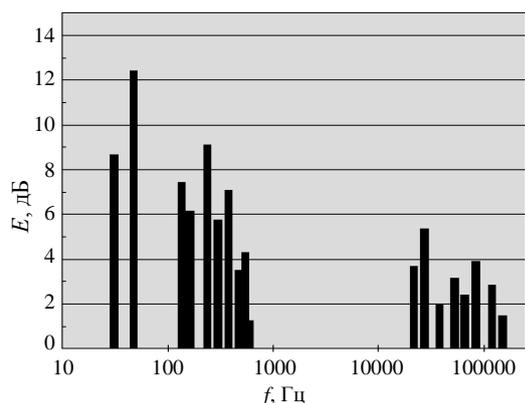


Рис. 7. Спектральная характеристика излучения монитора ПЭВМ в диапазоне 10 Гц – 400 кГц

Из анализа заболеваемости у работающих женщин с видеодисплейными терминалами (ВДТ) в возрасте до 50 лет со стажем работы 10 лет и более следует, что практически все жизнедеятельные системы человека подвержены существенным воздействиям:

- в 5–6 раз возрастают функциональные нарушения центральной нервной системы (ЦНС);
- заболеваемость сердечно-сосудистой системы (ССС) увеличивается в 2 раза;
- более чем в 4 раза возрастает количество болезней верхних дыхательных путей;
- заболевания опорно-двигательного аппарата увеличиваются в три-четыре раза;

– болезни желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) возрастают в 2 раза.

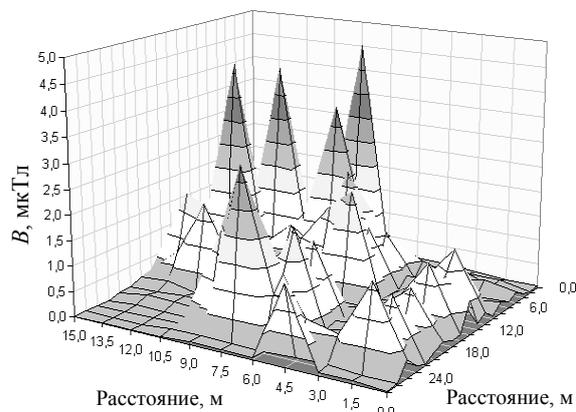


Рис. 8. Распределение магнитного поля в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в помещении видеодисплейного терминала

Общую картину дополняют данные, приведенные в табл. 2.

Здесь показано влияние неионизирующего ЭМИ на эндокринную систему БО и нейрогуморальная реакция на различное качество ЭМИ, которое определяется величинами удельного потока мощности (УПМ), плотностью потока мощности (ППМ), частотой излучения и длительностью облучения.

Таблица 2

Влияние неионизирующих ЭМП на эндокринную систему БО

Источник	Условия эксперимента	Результат
[24]	Крысы, ЭМП 45 ГГц, УПМ–7÷66 мВт/г, однократное воздействие в течение 260 мин. Люди, допустимое значение ППМ 100 мВт/см ² , острое облучение при частотах 1–3,5 МГц и 0,3–100 ГГц.	Морфологических изменений в семенниках крыс не обнаружено. Изменений в сперматогенезе нет.
[25]	Кролики, ЭМП 2450 МГц, ППМ–13÷35 мВт/см ² , воздействие 15–20 мин, облучались яичники. Исследовали сперматогенез.	Уменьшение спермы, способность к оплодотворению отсутствовала в течение 2 мес.
[25]	Люди-добровольцы, ЭМП 2,5 ГГц, ППМ–13÷35 мВт/см ² , облучали яичники 40–60 мин. Исследовали сперматогенез.	Количество спермы уменьшалось, подавлена жизнеспособность и подвижность сперматозоидов. Через 2 мес. их количество частично восстановилось. Обследование не выявило никаких видимых изменений.
[26]	Крысы (самцы), ЭМП 4,13 и 22 МГц, напряженность 300 В/м, облучение по 2 ч в день, 2 мес. Изучали сперматогенез.	Изменений в подвижности сперматозоидов не наблюдали. Способность к оплодотворению уменьшалась при 13 МГц.
[26]	Крысы (самцы), ЭМП 4,13 и 22 МГц, напряженность 300 В/м, облучение по 2 ч в день, 2 мес. Изучали анти- и постнатальное развитие потомства.	Ухудшение состояния антенатального развития во всех изучаемых группах, ухудшение постнатального развития и повышение смертности крысят при 13 и 22 МГц.
[27]	Крысы (90 самцов), ЭМП 13 МГц, напряженность 500 В/м, нерывный и прерывистый режимы, непрерывный 2 мес. По 1 ч 15 мин в день, прерывистый – 2 мес. по 2 ч в день. Изучали анти- и постнатальное развитие потомства.	Нарушение развития и увеличение смертности потомства. Наибольшим биологическим эффектом обладает прерывистый режим воздействия.

В настоящее время особое внимание уделяется изучению биологического действия модулированного (по амплитуде и частоте) ЭМИ [28]. Влияние такого сигнала на работу сердца показано в работе Е. А. Африканова и Ю. Г. Григорьева [29]. Результаты изменения числа сердцебиений и остановок изолированного сердца лягушки при ЭМ-облучении в непрерывном режиме и при различной импульсной модуляции от 1 до 100 Гц ($f = 9,3$ ГГц, $N_s = 0,016$ мВт/см²) приведены на рис. 9. В этой же работе авторами наблюдалась корреляция изменений частоты сердечных сокращений сердца лягушки с импульсной модуляцией СВЧ-поля. Максимальные значения изменений функциональной деятельности исследуемых объектов достигались при совпадении частоты модуляции с частотой биения сердца.

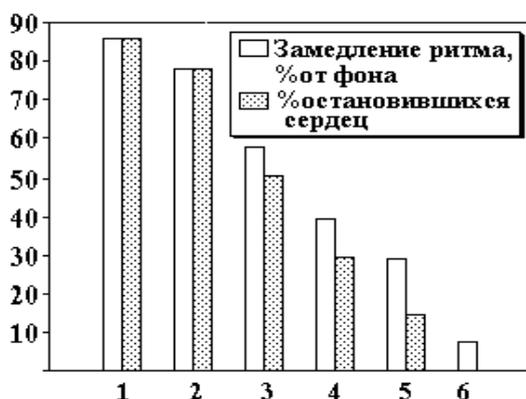


Рис. 9. Изменение числа сердцебиений и остановок изолированного сердца лягушки при ЭМ-облучении в непрерывном режиме и при различной импульсной модуляции: 1 – 1–6 Гц, время экспозиции 5 мин; 2 – 1–10 Гц, 10 мин; 3 – 1–100 Гц, 19 мин; 4 – непрерывный режим, 5 мин; 5 – контроль окраски; 6 – ложное облучение

Исследования влияния ЭМП миллиметрового диапазона (КВЧ) с плотностями потоков мощности $N_s \approx 10^{-3} \div 1$ Вт/см², в диапазоне частот

$f \approx 30 \div 300$ ГГц на живые организмы проводились академиком Н. Д. Девятковым и его сотрудниками [30, 31]. Для такого излучения характерен «резонансный» механизм воздействия, который вызывается быстрой диссипацией энергии ($\sim 10^{-10}$ с) на H₂O за счет межмолекулярного взаимодействия. В этих случаях наблюдается локальный нагрев кожи (температура $< 0,1$ °С). Времена экспозиции составляют десятки секунд-минут.

Проводимые в ИРЭ НАНУ исследования по воздействию низкоинтенсивного излучения КВЧ-диапазона на БО привели к обнаружению новых биологических эффектов:

- увеличение устойчивости БО к неблагоприятным факторам после предварительного облучения;
- стремление БО возвратиться к исходному состоянию (принцип Лэ-Шателье);
- восстановление функциональных свойств БО после предварительного угнетения (тепловое, УФ);
- экспериментально установлена возможность целенаправленной модификации биологических показателей при опосредованном воздействии ЭМП через воду.

Эти эффекты подтверждают значимость механизмов воздействия ЭМП, основанных на водно-диссипативной модели [32, 33].

2. Импульсные мощные генераторы ЭМИ. Воздействие мощных импульсных ЭМП на РЭА. Успешное развитие релятивистской СВЧ-электроники сверхбольшой мощности [1–7] открывает новые возможности в проведении исследований процессов воздействия интенсивных электромагнитных полей на различные физические объекты. В ходе исследований физических процессов ускорения и генерации в сильноточных ускорителях релятивистских электронных пучков (РЭП) в ННЦ ХФТИ был разработан и создан ряд мощных источников импульсного электромагнитного излучения [6–9, 34], перекрывающих широкий спектр частот микроволнового диапазона. Их параметры приведены в табл. 3.

Таблица 3

Источники импульсного электромагнитного излучения

Наименование стенда	E , МВ	I , кА	t , с	$P_{\text{пучка}}$, Вт	Тип излучения
«Астра»	0,5	20	$4 \cdot 10^{-8}$	10^{10}	СВЧ, (0,1÷10) кВ/см
«Агат»	0,3	4	$(0,4 \div 0,8) \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^9$	СВЧ, (0,1÷1) кВ/см
«Темп-А»	0,5	5	$4 \cdot 10^{-6}$	$2,5 \cdot 10^9$	–
«Темп-А»	1,4	10	$1,5 \cdot 10^{-8}$	$1,4 \cdot 10^{10}$	ЭМИ (0,1÷10) кВ/см
«Темп-Б»	1,0	~100	$2,5 \cdot 10^{-6}$	10^{11}	СВЧ, (0,1÷20) кВ/см

СВЧ-генераторы испытательных стендов обеспечивают в рабочей зоне уровни напряженностей электрического поля 0,1÷10 кВ/см. Особое внимание уделяется генерации импульсов ультракороткой длительности (УКДИ) $t = 10^{-8} \div 10^{-7}$ с.

В этом диапазоне длительностей обнаружены специфические реакции и изменения пороговых значений уровней напряженностей электрического поля, приводящего к деградациям в исследуемых объектах.

Испытательные стенды были использованы для исследований процессов деградации изделий электронной техники и других элементов РЭА при воздействии мощных импульсных электромагнитных полей и решения проблем электромагнитной совместимости РЭА. Результаты проведенных исследований показывают, что существует три вида деградаций, характер которых аналогичен процессам упругой деформации. Наиболее чувствительными к воздействию электромагнитного излучения являются полупроводниковые элементы микроэлектроники, для которых в ряде случаев пороговые уровни напряженности электрического поля могут составлять величину ~ 100 В/см.

Исходя из экспериментальных исследований [6, 7, 15, 37, 38] следует, что неионизирующие ЭМП оказывают существенное влияние на изделия радиоэлектронной техники. Характер повреждений зависит от количественной характеристики излучения, поскольку наблюдается усиление воздействия от количества импульсов (эффект сложения). Учитывая все это, следует сделать вывод, что вопросам электромагнитной надежности и безопасности промышленных, финан-

совых объектов и объектов управления должно быть уделено особое внимание [35–38].

Влияние короткоимпульсного ЭМИ большой амплитуды на медицинские и биологические объекты. Влияние ионизирующего излучения на природу и экологию, в отличие от неионизирующего, достаточно хорошо изучено. Исследования влияния неионизирующего импульсного излучения большой мощности находятся на начальной, но интенсивно развивающейся стадии. Одной из особенностей различия является обнаружение большого количества механизмов воздействия.

На стендах экспериментальной базы ННЦ ХФТИ были проведены исследования влияния короткоимпульсного СВЧ-излучения сантиметрового диапазона длин волн различной мощности и длительности импульса на БО.

Экспериментальные установки имеют хорошую повторяемость выходных параметров от импульса к импульсу. Методика исследований предполагала облучение объектов при различных напряженностях полей СВЧ-излучения. Основные [18, 19] характеристики установок приведены в табл. 4.

Таблица 4

Характеристики параметров СВЧ-генераторов

Наименование стенда	Длина волны λ , см	Импульсная мощность $P_{\text{СВЧ}}$, МВт	Длительность импульса, τ , нс	Длительность фронта, нс
«Темп-А»	СШП	200	15	1
«Темп-Б»	3–5	до 1000	$\sim 1,5 \cdot 10^3$	~ 200
«Астра»	3–10	500	30	
«Агат»	3–10	$7 \div 10$	$(4 \div 6)10^2$	$150 \div 200$

Объектами испытаний на испытательных стендах «Астра» и «Агат» были: колорадский жук, семена озимой пшеницы, семена шелковицы. Объекты располагались на различных расстояниях от конического излучающего рупора диаметром апертуры 120 мм.

Однотипные объекты облучались одновременно одними и теми же СВЧ-импульсами в зависимости от числа импульсов и расстояния. В ходе облучения семян сельскохозяйственных культур устойчиво наблюдалось увеличение энергии прорастания на 30–45 %, всхожести на 9–16 %. При облучении колорадского жука на 2–3-й день после облучения проявляется изменение окраски хитинового покрова, а на 8-й день < 50 % особей погибает. Интересный факт наблюдался при облучении мышей. После 2–3-го импульса мыши располагались по краю диаграммы направленности, т. е. стремились в минимум поля импульса.

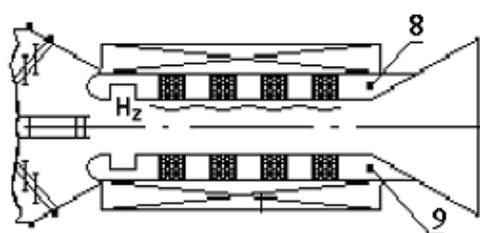
Одним из доступных и важных биологических объектов, связанных с жизнедеятельностью человека, является кровь. Этот БО постоян-

но находится под пристальным вниманием исследователей [39, 40]. Поэтому объектом данных исследований были эритроциты донорской крови чернобыльцев, полученные из консервированной эритроцитарной массы. Исследования проводились совместно с Институтом криобиологии и криомедицины НАНУ и Харьковским НИИ медицинской радиологии.

Эксперименты по влиянию короткоимпульсного мощного СВЧ-излучения на донорскую кровь проводились на установке «Темп-Б». Схема проведения экспериментов показана на рис. 10. Исследуемые эритроциты крови брались у 20 доноров, а затем эритроциты каждого донора делились на 10 частей (образцов) по 10 мл и разливались в радиопрозрачные флаконы. Семь образцов, с 1-го по 7-й, размещались вдоль оси распространения СВЧ-излучения в областях напряженностей полей $E_{\text{нз}} \approx (7 \cdot 10^3 \div 150)$ В/см, а 8-й и 9-й располагались в зоне рентгеновского излучения со средней энергией γ -квантов $\sim 0,5$ МэВ при экспозиционной дозе 100 рентген за импульс

(рис. 10, поз. 8, 9). Контролем служил интактный образец крови, расположенный в диагностической комнате. Второй контрольный образец находился в НИИ радиологии, где и производился анализ облученной донорской крови.

О функциональном состоянии эритроцитов судили по значениям комплекса показателей: 1 – свободный гемоглобин в надосадочной жидкости; 2 – рН клеточной взвеси; 3 – осмотическая хрупкость в гипотонических растворах хлористого натрия с концентрациями 0,9; 0,6; 0,3 %; 4 – относительная вязкость; 5 – ротационная вязкость; 6 – объемно-плоскостные характеристики клеток; 7 – электрорезистентность клеточных мембран.



Последние характеристики (6, 7) были получены с помощью прибора электроцитанализатора ЭЦА-2, который позволяет фиксировать распределение клеток популяции в зависимости от их размеров, ток пробоя, сопротивление пробоя, свидетельствующие о состоянии мембран клеток, их прочности, о наличии возможных в них повреждениях.

Анализ данных, полученных с помощью цитоанализатора, свидетельствует об увеличении объемно-плоскостных параметров эритроцитов (*MCV*) по сравнению с интактным и расширении площади гауссовского распределения вправо, что указывает на набухание клеток от СВЧ-излучения.

Расположение образцов с кровью							
1	2	3	4	5	6	7	z
7	4	2	1	0,6	0,25	0,15	
Интенсивность СВЧ-поля, кВ/см							

Рис. 10. Схема проведения эксперимента

Этот же прибор указывает на изменение электрических свойств эритроцитарных мембран. Так, для донора с группой крови А(II) ток и напряжение пробоя составляют $I_{пр} = 394,8$ мкА, $U_{пр} = 0,59$ В соответственно, а для донора с группой В(III) – $I_{пр} = 405,77$ мкА, $U_{пр} = 0,93$ В, при значениях $I_{пр} = 392,07$ мкА, $U_{пр} = 0,6$ В – для контрольных образцов. Обнаружено, что показатель относительной вязкости по Освальду снижен для 60÷80 % случаев. Для ротационной вязкости в 75 % случаев наблюдается повышение упругости мембран эритроцитов при напряженности поля излучения $E_{из} \approx (250 \div 150)$ В/см. При этом эритроцитарная масса имеет стабильные свойства в широком диапазоне нагрузок. Примером этому служит график зависимости ротационной вязкости (*D*) от модуля сдвига (*J*), приведенный на рис. 11. Здесь кривые 1 – СВЧ-поля 200 В/см; 2 – контрольная; 3 – рентгеновского воздействия.

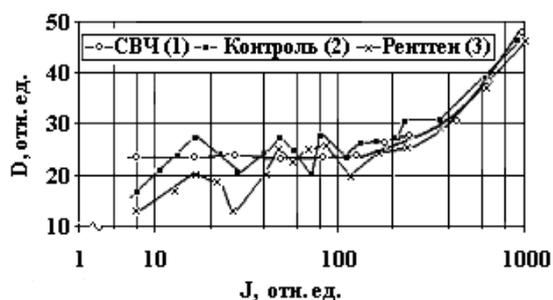


Рис. 11. Зависимость ротационной вязкости от модуля сдвига

Увеличение амплитуды поля приводит к разрушению эритроцитарной массы аналогично действию рентгеновского излучения. Отмечаются факты восстановления функциональных свойств БО после предварительного угнетения (рентгеновское излучение).

Следует подчеркнуть, что положительный биологический эффект (возвращение параметров БО к норме) наблюдается только при этих полях. Теоретические предпосылки, основанные на этих результатах, позволяют считать перспективным применение мощных импульсных СВЧ-полей для обработки донорской крови на этапах ее гипотермии и замораживания с целью создания нового метода консервации [41, 42].

Полученные экспериментальные результаты не могут быть объяснены «тепловым» или «резонансным» [30, 33] механизмами, характеризующимися малой интенсивностью СВЧ-полей и длительным временем воздействия. В наших экспериментах длительность импульса очень короткая ($t_{и} \sim 10^{-6}$ с), излучаемая длина волны много больше размеров объекта, а оценка величины нагрева не превышает 0,01 °С. Следовательно, ответственным за результаты воздействия мощного короткоимпульсного СВЧ-излучения на эритроциты донорской крови может быть механизм, вызванный наличием больших значений полей $E_{из} \sim (250 \div 150)$ В/см и скоростью их изменения $dE/dt \sim 10^{10}$ В/см·с, приводящий к изменению внутримембранных связей, а не «тепловой» [23, 28].

Подтверждение нарушения внутримембранных связей за счет поляризационных процессов показаны в экспериментах по облучению изолированной клетки печени сверхширокополосным (СШП) излучением с амплитудой $E_{из} \sim 2500 \div 150$ В/см [43] и эритроцитов донорской крови диабетиков [44]. Характер воздействия зависит и от количественной характеристики излучения, поскольку наблюдается сложение эффектов от количества импульсов (рис. 12).

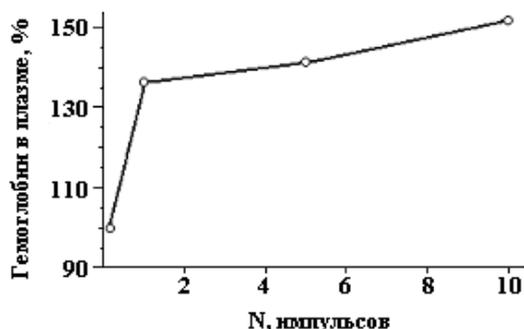


Рис. 12. Зависимость содержания гемоглобина от количества импульсов СШП-импульсов

Интересные результаты были получены по не тепловому воздействию импульсных ЭМП на семена ячменя в сравнении с химической обработкой (протравление) [45]. В экспериментах использовались два типа импульсных ЭМП: СШП – излучение наносекундной и ЭМП – микросекундной длительности.

Генерация СШП-излучения наносекундной длительности осуществлялась прямым возбуждением ТЕМ-рупора сильноточным релятивистским электронным пучком с параметрами ($E_b \approx 0,5 \div 1$ МэВ, $I_b \approx 5 \div 10$ кА, $t \approx 15$ нс). Излученный сигнал имел вид δ -функции с длительностью $\sim 1-2$ нс и ЭМП аperiodичной формы микросекундной длительности.

Облучаемый материал (ячмень массой 300 г) в первом случае располагался в местах с различной напряженностью поля ($\sim 2000, 1000$ и 500 В/см), а во втором – в области с напряженностью поля ~ 16 кВ/см. В первом случае исследовалась и зависимость от количества импульсов. Величина интегральной дозы излучения определялась числом воздействующих импульсов (1, 5, 10).

Результаты лабораторных и полевых испытаний в условиях вегетации 2001 г. семян ячменя и яровой пшеницы, зараженных головней, приведены на гистограмме (рис. 13) и показали:

– по всхожести, общему количеству стеблей, количеству продуктивных стеблей на одно растение показатели были на уровне, характерном для

стандартной обработки протравителем (бенлат 2,5 кг/г);

– по уровню зараженности растений головней в результате облучения электрическими импульсами высокой интенсивности показатель имел значение ниже характерного для стандартной обработки протравителем.

Таким образом, приведенные экспериментальные данные указывают на то, что импульсное ЭМИ большой амплитуды оказывает существенное влияние как на изделия электронной техники, так и на медико-биологические объекты.

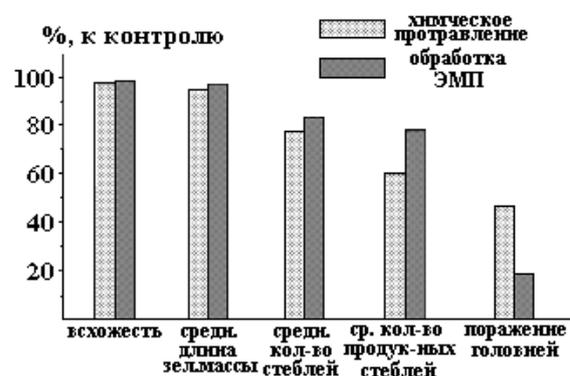


Рис. 13. Сравнительная гистограмма полевых испытаний в условиях вегетации 2001 г. при химическом протравлении и воздействии ЭМП

Выводы. Таким образом, из анализа экспериментальных результатов и данных БД *INIS* за 1970–2007 гг. следует, что неионизирующее ЭМИ является фактором, существенно влияющим на экологию окружающего пространства и всего живого. Отметим его отличие от ионизирующих факторов:

- механизм воздействия еще не изучен;
- практически постоянное и круглосуточное облучение населения;
- расширение облучаемой территории с его населением;
- стремительный рост ЭМ-загрязнения среды с реальным отрицательным прогнозом;
- не изучена патология, включая отдаленные последствия. Не разработаны средства профилактики и защиты;
- зависимость биоэффекта от частоты излучения, дозы и модуляции, амплитуды сигнала и скорости роста ее;
- постоянный рост вопроса электромагнитной совместимости.

Влияние мощного короткоимпульсного СВЧ-излучения имеет свои особенности:

– носит не тепловой характер, а полевой, за счет поляризационных процессов происходит

нарушение внутримембранных связей и образование каналов;

– эффект носит пороговый характер в отношении $E_{из}$ и dE/dt для различных типов импульсов (наносекундные и микросекундные);

– усиление эффекта за счет количественного фактора (сложение числа импульсов);

– такие воздействия могут быть использованы для разработок новых видов биомедицинских технологий (для обработки донорской крови на этапах ее гипотермии и замораживания с целью создания нового метода консервации, терапии генной инженерии и т. д.).

Эти вопросы не могут быть задачей одних ученых и должны решаться на государственном уровне, включая всестороннюю поддержку, в том числе финансовую, экономическую и законодательную.

Авторы выражают благодарность заведующему отделом ИРЭ НАНУ, доктору физмат. наук, профессору С. А. Масалову, за внимание к работе и полезные советы при обсуждении статьи.

Работа выполнена при информационной поддержке по Гранту INTAS 00–02 и проекту ЯМРТ X-5-527.

1. Диденко А. П., Юшков Ю. Г. Мощные СВЧ-импульсы наносекундной длительности. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 112 с.
2. Ткач Ю. В., Магда И. И., Скачек Г. В. и др. Релаксация сильноточного релятивистского пучка в плазме // Физика плазмы. – 1980. – 6, вып. 3. – С. 568–597.
3. Ткач Ю. В., Файнберг Я. Б., Гадецкий Н. П. и др. Возбуждение интенсивных колебаний сильноточными релятивистскими пучками // Укр. физ. журн. – 1978. – 23, № 11. – С. 1902.
4. Диденко А. Н., Григорьев В. П., Жерлицын А. Г. Генерация электромагнитных колебаний в системах с виртуальным катодом // Плазменная электроника. – Киев: Наук. думка, 1989. – С. 112.
5. Жерлицын А. Г., Мельников Г. В., Фоменко Г. П. и др. // Физика плазмы. – 1990. – 16, вып. 1. – С. 100.
6. Гадецкий Н. П., Магда И. И., Найстетер С. И. и др. Генератор на сверхкритическом токе РЭП с управляемой обратной связью – виртод // Физика плазмы. – 1993. – 19, вып. 4. – С. 273–276.
7. Блудов С. Б., Гадецкий Н. И., Магда И. И. и др. Генерирование мощных СВЧ-импульсов ультракороткой длительности и их воздействие на изделия электронной техники // Физика плазмы. – 1994. – 20, вып. 7–8. – С. 712–718.
8. Ермоленко В. В., Лонин Ю. Ф., Прасол Е. А., Харченко И. Ф. Мощный СВЧ-генератор с релятивистским пучком на основе комбинации виркатора и убитрона // Тр. 7-й Крымской конф. и выставки (КрыМиКо 1997). – Севастополь, 1997. – Т. 2. – С. 447–449.
9. Гапоненко Н. И., Горбань А. М., Горожанин Д. В. и др. Формирование интенсивных электромагнитных импульсов, излучаемых при прямом возбуждении изолированной штыревой антенны короткоимпульсным сильноточным РЭП // Физика плазмы. – 2000. – 26, вып. 4. – С. 1–3.
10. Wunsch D. S., Bell R. R. Determination of threshold failure level of semiconductors diodes and transistors due to pulse

- voltage // IEEE Trans. on Nuclear Sci. – 1968. – V.NS-15, No. 6. – P. 244–259.
11. Forrest J. Agree, Carl E. Baum, William D. Prather et al. // IEEE Transactions on plasma science. – 1998. – 26, No. 3. – P. 860–873.
12. Michele Angles. Revue scientifique et technique de la Direction des applications militaires. – 1998. – No. 18. – P. 83–90.
13. Wald H., Schmidt F., Seidel P., Tonouchi M. // Supercond. Sci. Technol. – 2002. – 15. – P. 1494–1498.
14. Rakchanok Rungsawang, Keisuke Ohta, Keiji Rikamoto, Toshiaki Hattori // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – 36. – P. 229–235.
15. Егоров А. М., Лонин Ю. Ф., Чумаков В. И. и др. // ВАНТ. Сер. Яд. физ. иссл. – 2004. – 43, № 2. – С. 203–205.
16. Телл Р. А., Мэнтинли Э. Д. Облучение населения ОВЧ и УВЧ сигналами широкополосных станций США // ТИИЭР. – 1980. – 68, № 1. – С. 6–12.
17. Goetz A. F. H and Rowan L. C. Geologic Remote Sensing Science. – 1981. – 211. – P. 752–781.
18. Григорьев Ю. Г., Степанов В. С., Григорьев О. А., Меркулов А. В. Электромагнитная безопасность человека. – М.: Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения, 1999. – 146 с.
19. Минин Б. СВЧ и безопасность человека. – М.: Советское радио, 1974. – 352 с.
20. Рогов И. А., Некрутман С. В. СВЧ нагрев пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1986. – 351 с.
21. Гай А. В., Леманн Ю. Ф., Стоунбридж Дж. Применение электромагнитной энергии в терапии // ТИИЭР. – 1974. – 62, № 1. – С. 66–93.
22. Шван Х. П., Форстер К. Р. Воздействие высокочастотных полей на биологические системы // ТИИЭР. – 1980. – 68, № 1. – С. 121.
23. Майкалсон С. М. Биологические эффекты СВЧ излучения: Обзор // ТИИЭР. – 1980. – 68, № 1. – С. 49–68.
24. Saunders R. D. // Radiat. Biol. – 1981. – 39, № 6. – P. 587–596.
25. Jiang H. B. 33 Ann. Meet. of the Rad.Res. Society. – Los Angeles: CA (USA), 1985. – P. 23.
26. Шапошникова Е. С., Минкина Н. А., Чеботарь Н. А. и др. Влияние модулированных ЭМП ВЧ на репродуктивную функцию крыс-самцов и состояние потомства // Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных ЭМП диапазона радиочастот: сб. тр. / Моск. НИИ гигиены труда им. Ф. Ф. Эрисмана. – М., 1990. – С. 60–66.
27. Шапошникова Е. С., Минкина Н. А., Чеботарь Н. А. и др. Влияние модулированных ЭМП ВЧ на репродуктивную функцию крыс-самцов и состояние потомства // Там же. – С. 67–74.
28. Эйди У. Р. Частотные и энергетические окна при воздействии слабых электромагнитных полей на живую ткань // ТИИЭР. – 1980. – 68, № 1. – С. 140–147.
29. Африканова Е. А., Григорьева Ю. Г. Радиационная биология // Радиоэкология. – 1996. – 36, вып. 5. – С. 691–699.
30. Девятков Н. Д., Бецкий О. В., Голант и др. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. – М.: Радио и связь, 1991. – 168 с.
31. Бецкий О. В., Девятков Н. Д. Электромагнитные миллиметровые волны и живые организмы // Радиотехника. – 1996. – № 9. / Биомедицинская радиоэлектроника – № 3. – С. 4–11.
32. Коваленко О. И. Воздействие низкоинтенсивных электромагнитных полей на семена растений и микроорганизмы: Автореф. дис.... канд. физ.-мат. наук. – 2008.
33. Коваленко О. И., Кивва Ф. В., Калининченко С. В. Особенности воздействия широкополосных низкоинтенсивных электромагнитных сигналов на семена растений и коринебактерии // Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 2 (37). – С. 1–120.
34. Balakirev V. A., Gaponenko N. I., Gorban' A. M. et al. Excitement TEM-horn antenna by impulsive relativistic electron beam // ВАНТ. Сер. Физика плазмы. – 2000. – 5, № 3. – С. 118–119.

35. Балакирев В. А., Горбань А. М., Егоров А. М., Кантемиров А. В. и др. Генерация СШП сигнала при возбуждении спиральной антенны сильноточным РЭП // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. – 2006. – 46, № 2. – С. 85–87.
36. СВЧ устройства на полупроводниковых диодах. Проектирование и расчет / Под ред. И. В. Мальского и Б. В. Сестрорещкого. – М.: Сов. радио, 1969. – 580 с.
37. Мырова Л. О., Чепиженко А. З. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
38. Абдурахимов Д. Е., Бочикашвили П. Н., Верецагин В. Л. и др. // Микроэлектроника. – 1992. – 21, вып. 1. – С. 82–89.
39. Лонин Ю. Ф. Вопросы электромагнитной надежности и безопасности ядерных объектов // 7-я Междунар. науч.-практ. конф. Чернобыльского центра и ГСП «Чернобыльская АЭС», «Ядерные объекты: надежность и безопасность». – Славутич, 2005. – С. 67–68.
40. Залобовская Н. П., Киселев Р. И., Девятков Н. Д. Использование энергии сверхвысоких частот для отогрева эритроцитов крови, консервированных глубоким замораживанием // Проблемы гематологии и переливания крови. – 1977. – 22, № 8. – С. 56–57.
41. Пушкарь Н. С., Тимошенко Ю. П., Лобынцева Г. С., Щербак Г. В. Современное состояние проблемы размораживания органов и тканей // Итоги науки и техники. Сер. Биоптика. – 1978. – 9. – С. 8–52.
42. Пушкарь Н. С., Гадецкий Н. П., Лонин Ю. Ф. и др. Эффекты биологического действия короткоимпульсного СВЧ излучения большой интенсивности на эритроциты донорской крови // Матер. 4-й Междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1994. – Т. 1. – С. 200–203.
43. Onishenko I. N., Gaponenko N. I., Dikij N. P. et al. High-power EM-pulse influence on isolated cells // 25-th International Power Modulator Symposium and 2002 High Voltage Workshop IEEE. – P. 502–505.
44. Gordienko E. A., Rosanov L. F., Gaponenko N. I. et al. The effect of nanosecond ultrawideband electromagnetic radiation on xenogenic erythrocytes // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. – 2001. – № 5. – С. 194–196.
45. Алферов Н. Е., Егоров А. М., Гапоненко Н. И. и др. Комплексные экспериментальные исследования биологичес-

кого действия импульсных электромагнитных полей // Тр. 13-й Крымской конф. и выставки «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2003. – С. 78–79.

UNIONIZING ELECTROMAGNETIC RADIATION AND ECOLOGY

A. M. Egorov, A. Yu. Lonin, Yu. F. Lonin,
V. I. Chumakov, A. G. Shepelev, O. V. Nemoshkalo

The modern condition of electromagnetic ecological conditions is stated, the analysis of natural and artificial sources of electromagnetic radiation (EMR) and their characteristics are given. Medical and biologic, hygienic and ecological influence aspects of electromagnetic radiations both on the person and on ecosystem as a whole are considered. Results of experimental researches in IPENMA NSC KIPT on influence of EMR on medical and biologic objects are given.

Key words: pulse power electromagnetic radiation, influence, biology and medical object.

НЕІОНІЗУЮЧЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

О. М. Єгоров, О. Ю. Лонін, Ю. Ф. Лонін,
В. І. Чумаков, А. Г. Шепелєв, О. В. Немашкало

Викладено сучасний стан електромагнітної екологічної обстановки, дається аналіз природних і штучних джерел електромагнітного випромінювання (ЕМВ), їх характеристики. Розглядаються медико-біологічні, гігієнічні й екологічні аспекти впливу електромагнітних випромінювань, як на людину, так і на екосистему в цілому. Наведено результати експериментальних досліджень в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорення Національного наукового центру Харківський фізико-технічний інститут з дії ЕМВ на медико-біологічні об'єкти.

Ключові слова: імпульсне потужне електромагнітне випромінювання, вплив, медико-біологічні об'єкти.

Рукопись поступила 20 февраля 2009 г.