

ВОЗДЕЙСТВИЕ НЕИОНИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

Ю.Ф. ЛОНИН, А.М. ЕГОРОВ, А.Ю. ЛОНИН, В.И. ЧУМАКОВ

В работе приведены результаты анализа экспериментальных исследований воздействия неионизирующего электромагнитного излучения на медико-биологические объекты. Рассмотрены примеры естественных и антропогенных источников электромагнитного излучения, описаны схемы и приведены параметры экспериментальных установок и методики экспериментов. Проанализированы результаты биологического действия неионизирующего электромагнитного излучения малой интенсивности большой длительности и воздействия короткоимпульсного электромагнитного излучения большой интенсивности.

The paper provides the results of analyzing experimental studies of the effect of non-ionizing electromagnetic radiation on medical and biological objects. Examples of natural and anthropogenic sources of electromagnetic radiation are considered. The paper describes diagrams and provides parameters of experimental set-ups and procedures of experiments. The results of biological action of long-duration low-level intensity non-ionizing electromagnetic radiation and effect of high-level intensity short pulse electromagnetic radiation are analyzed.

ВВЕДЕНИЕ

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, электромагнитные поля (ЭМП) работающих технологических устройств различного назначения. Вопросам защиты от неионизирующего электромагнитного излучения (ЭМИ) уделяется серьезное внимание во многих странах мира [1].

В табл. 1 приведена сравнительная оценка характеристик ионизирующего и неионизирующего ЭМИ, с точки зрения опасности для человека.

Чтобы оценить степень влияния неионизирующего электромагнитного излучения приведем следующие данные по природным источникам:

- естественное электрическое поле Земли создается избыточным отрицательным зарядом на ее поверхности, и напряженность такого поля колеблется в пределах от 100 до 500 В/м, грозовые облака увеличивают эту величину до десятков-сотен кВ/м;
- 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 ~ 40А/м (50 мкТл), переменная составляющая определяется процессами, протекающими в магнитосфере и ионосфере (магнитные бури), которые вызы-

Таблица 1

| ИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ                                                                                           | НЕИОНИЗИРУЮЩЕЕ ИЗЛУЧЕНИЕ                                                                                               |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Различия                                                                                                         |                                                                                                                        |
| Механизм биологического действия хорошо известен                                                                 | Механизм не изучен                                                                                                     |
| Непостоянное облучение населения                                                                                 | Постоянное, практически круглосуточное облучение населения                                                             |
| Облучение ограниченной территории, ограниченного контингента населения                                           | Постоянное расширение облучаемой территории с его населением                                                           |
| Стабильность уровня в окружающей среде                                                                           | Стремительный рост электромагнитного загрязнения среды с реальным отрицательным прогнозом                              |
| Возможность измерений и мониторинга по всей территории                                                           | Отсутствие обеспечения средствами измерения и возможности мониторинга по всей территории                               |
| Хорошо изучена патология, включая отдаленные последствия. Разработана эффективная профилактика, терапия и защита | Не изучена патология, включая отдаленные последствия, не разработаны средства профилактики и защиты                    |
| Четкая зависимость «доза-эффект»                                                                                 | Зависимость биологического эффекта не только от дозы, но и от модуляции                                                |
| Общее                                                                                                            |                                                                                                                        |
| Недооценка опасности в период 1947–1986 гг.                                                                      | Недооценка опасности с 1980 г. по настоящее время.                                                                     |
| Принятие кардинальных мер по защите, контролю и профилактике только после катастрофы на ЧАЭС (1986 г.)           | Отсутствие принятия государственных мер по изучению патологии, защите, профилактике и контролю загрязнения экосистемы. |

вают 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 галактикой, занимают область частот  $10^7$ – $10^9$  Гц. В «спокойном» состоянии активность солнечного излучения находится в пределах  $10^{-10}$ – $10^{-8}$  Вт/м<sup>2</sup> · МГц, а во время вспышек оно увеличивается в несколько десятков раз; спектр и интенсивность излучения галактики близки к излучению спокойного Солнца;

- человеческое тело также излучает ЭМП с частотой выше 300 ГГц, с плотностью потока мощности  $\sim 0,003$  Вт/м<sup>2</sup>.

Для сравнения в табл. 2 приведены значения антропогенных источников ЭМИ в полосе частот  $3 \cdot 10^3$  –  $3 \cdot 10^{11}$  Гц.

## 1. БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ НЕИОНИЗИРУЮЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МАЛОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

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 техника, работающая в самых различных диапазонах частот и режимах излучения [2].

Механизмы воздействия ЭМИ малой интенсивности и большой длительности (времена экспозиции — минуты, часы, а также от нескольких дней до несколь-

ких месяцев) существенно зависят от типов объектов их физико-химических свойств, времени экспозиции. Существенную роль в определении механизма и степени влияния играет качество электромагнитного излучения, т. е. его частота, амплитуда, прерывность, модуляция как по частоте, так и по амплитуде.

Одним из основных механизмов электромагнитного воздействия, достаточно подробно изученных и успешно используемых в различных отраслях народного хозяйства, является «тепловой механизм» [3]. Физический принцип «теплого механизма» основан на поглощении объектом (с собственными диэлектрическими и магнитными характеристиками) электромагнитной волны. При этом, нагрев (воздействие) может быть как объемным, так и избирательным при аномальном распределении электромагнитных характеристик объекта. Температура нагрева может варьироваться от нескольких градусов до температур фазового перехода.

В данном разделе приведены результаты влияния ЭМП малых интенсивностей на живые организмы как в целом, так и на их функциональные системы в отдельности. В табл. 3 приведен анализ структуры заболеваемости у женщин, работающих с видеодисплейными терминалами (ВДТ) в возрасте до 50 лет со стажем работы 10 лет и более; в табл. 4 приведены результаты исследований влияния неионизирующего электромагнитного излучения на эндокринную систему живых организмов, а также характеристики нейрогуморальной реакции на различное качество ЭМИ (здесь УПМ — удельный поток мощности; ППМ — плотность потока мощности).

Таблица 2\*

| 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<br>220 м                 | 121 В/м (40 Вт/м <sup>2</sup> )<br>27,5 В/м (2 Вт/м <sup>2</sup> ) | 750 кВт            |
| Ручные радиостанции типа «Уоки-токи»                       | 27 МГц                                  | 5 см<br>12 см                 | <1000 В/м, <0,2 А/м<br><200 В/м, <0,1 А/м                          | Несколько ватт     |
| Мобильные телефоны                                         | 20 МГц–2 ГГц                            | 10 м                          | 300 В/м                                                            |                    |
| Телевизионные передатчики                                  | 47–68 МГц<br>174–230 МГц<br>470–890 МГц | 1,5 км                        | 5–20 мВт/м <sup>2</sup>                                            |                    |
| Радиостанции FM                                            | 87,5–108 МГц                            | 1,5 км                        | 50 мВт/м <sup>2</sup>                                              | 100 кВт            |
| Системы охраны                                             | 0,9–10 ГГц                              | В зоне действия системы       | < 2 мВт/м <sup>2</sup>                                             |                    |
| Радиолокаторы стационарные                                 | 1–10 ГГц                                | 0,1–10 км                     | 0,1–10 Вт/м <sup>2</sup>                                           | 0,2–20 кВт         |
| Радиолокационные системы службы слежения авиатранспорта    | 9–35 ГГц                                | 3 м<br>10 м                   | < 250 мВт/м <sup>2</sup><br>< 10 мВт/м <sup>2</sup>                | 0,5–100 мВт        |
| Установки СВЧ-нагрева                                      | 2,45 ГГц                                | 5 см<br>1 м                   | 10–50 Вт/м <sup>2</sup><br>< 0,25 мВт/м <sup>2</sup>               |                    |
| Экспериментальные установки релятивистской СВЧ-электроники | 3–21,6 ГГц                              | 1 м                           | < 1 кВ/см                                                          | до $10^9$ Вт       |

\* Параметры источников ЭМП взяты по данным Международного комитета по защите от неионизирующих излучений 1996 г.

Таблица 3

| Болезни                               | Работающие с ВДТ от 2 до 6 ч.<br>в сутки (407 чел.), % | Контрольная группа<br>(74 чел.), % | Работающие с ВДТ 6 и более<br>часов в сутки (45 чел.), % |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Функциональные нарушения ЦНС          | 12,5 ± 3,30                                            | 2,7 ± 1,7                          | 15,6 ± 5,5                                               |
| Болезни ССС                           | 46,0 ± 12,5                                            | 23,0 ± 4,9                         | 57,7 ± 7,5                                               |
| Болезни верхних дыхательных путей     | 16,9 ± 1,8                                             | 4,1 ± 2,3                          | 20,0 ± 6,0                                               |
| Болезни ЖКТ                           | 34,9 ± 2,9                                             | 18,0 ± 4,8                         | 40,0 ± 7,5                                               |
| Болезни опорно-двигательного аппарата | 16,7 ± 1,8                                             | 5,4 ± 2,8                          | 22,2 ± 6,3                                               |

Таблица 4

| Автор, источник                                                                                                                                      | Условия эксперимента                                                                                                                                                                                                         | Результат                                                                                                                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| [4] Saunders R.D. et al // Radiat. Biol. 1981. 39. 6. P.587-596                                                                                      | – Крысы, ЭМП 45 ГГц, УПМ 7–66 мВт/г, однокр. воздействие в течение 260 мин. Исследовались семенники крыс.<br>– Люди, допустимое значение ППМ 100 мВт/см <sup>2</sup> , острое облучение при частотах 1–3,5 МГц и 0,3–100 ГГц | Морфологических изменений в семенниках крыс не обнаружено.<br><br>Изменений в сперматогенезе нет                                                                                               |
| [5] Jiang H.B // 33 Ann. Meet. of the Rad. Res. Society, Los Angeles. CA (USA), 5-9 May 1985. P.23                                                   | Кролики, ЭМП 2450 МГц, ППМ 13–35 мВт/см <sup>2</sup> , воздействие 15–20 мин, облучались яичники. Исследовали сперматогенез                                                                                                  | Уменьшение спермы, способность к оплодотворению отсутствовала в течение 2 мес.                                                                                                                 |
| [5] Jiang H.B // 33 Ann. Meet. of the Rad. Res. Society, Los Angeles. CA (USA), 5-9 May 1985. P.23                                                   | Люди-добровольцы, ЭМП 2450 МГц, ППМ 13–35 мВт/см <sup>2</sup> , облучали яичники 40–60 мин. Исследовали сперматогенез                                                                                                        | Кол-во спермы уменьшалось, подавлена жизнеспособность и подвижность сперматозоидов. Через 2 мес. кол-во частично восстановилось. Медицинское обследование не выявило никаких видимых изменений |
| [6] Шапошникова Е.С. и др. // Сб.тр. Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных ЭМП диапазона радиочастот. – М., 1990. – С. 60-66 | 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                                                                                       |
| [6] Шапошникова Е.С. и др. // Сб.тр. Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных ЭМП диапазона радиочастот. – М., 1990. – С. 60-66 | Крысы (самцы), ЭМП 4,13 и 22 МГц, напряженность 300 В/м, облучение по 2 ч в день, 2 мес. Изучали ante- и постнатальное развитие потомства                                                                                    | Ухудшение состояния антенатального развития во всех изучаемых группах, ухудшение постнатального развития и повышение смертности крысят при 13 и 22 МГц                                         |
| [7] Шапошникова Е.С. и др. // Сб.тр. Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных ЭМП диапазона радиочастот. – М., 1990. – С. 67-74 | Крысы (90 самцов), ЭМП 13 МГц, напряженность 500 В/м, непрерывный и прерывистый режимы, непрерывный – 2 мес. по 1 ч 15 мин в день, прерывистый – 2 мес. по 2 ч в день. Изучали ante- и постнатальное развитие потомства      | Нарушение развития и увеличение смертности потомства. Наиболее большим биологическим эффектом обладает прерывистый режим воздействия                                                           |

В последнее время особое внимание уделяется изучению биологического действия модулированного (по амплитуде и частоте) ЭМ излучения. Влияние такого сигнала на работу сердца показано в работе [8]. Результаты изменения числа сердццебиений 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/см<sup>2</sup>) приведены на рис. 1.

В этой же работе авторами наблюдалась корреляция в изменениях частоты сердечных сокращений сердца лягушки в зависимости от модуляции СВЧ поля. Максимальные значения достигали при совпадении частоты модуляции с исходной частотой сокращений сердца исследуемых объектов.

Исследования влияния ЭМП миллиметрового диапазона на медико-биологические объекты с плотностями потоков мощности  $N_s \approx 10^{-3} \div 1$  Вт/см<sup>2</sup>, в диапа-

зоне частот  $f \approx 30 \div 300$  ГГц на живые организмы проводились акад. Девятковым и его сотрудниками [9, 10]. Для такого излучения характерен «резонансный» механизм воздействия, вызванный быстрой диссипацией энергии ( $\sim 10^{-10}$  с) на  $H_2O$  за счет межмолекулярного взаимодействия. В этих случаях наблюдается локальный нагрев кожи (температура  $< 0,1$  °С). Времена экспозиции составляют десятки секунд — минуты.

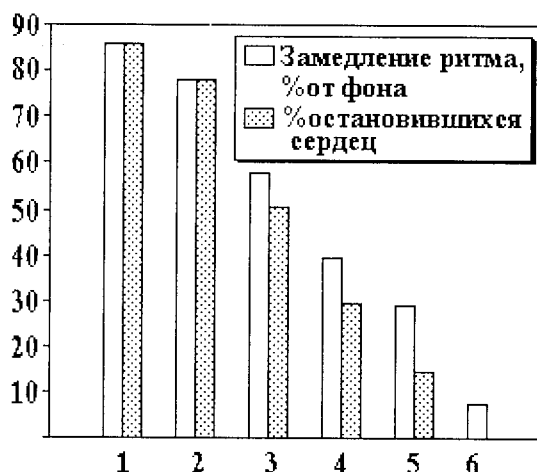


Рис. 1. Изменение числа сердцебиений и остановок изолированного сердца лягушки при ЭМ облучении в непрерывном режиме и при различной импульсной модуляции:

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

Анализ воздействия ЭМП на медикобиологические объекты, а особенно модуляция и прерывность процесса, указывают на тот факт, что импульсное излучение играет существенную роль в механизмах воздействия.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КОРОТКОИМПУЛЬСНОГО ЭМ-ИЗЛУЧЕНИЯ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ НА МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ ОБЪЕКТЫ

На стендах экспериментальной базы ННЦ «ХФТИ» были проведены исследования влияния короткоимпульсного СВЧ-излучения сантиметрового диапазона длин волн различной мощности и длительности импульса на биологические объекты. Экспериментальные установки имеют хорошую повторяемость выходных параметров от импульса к импульсу. Основные характеристики установок приведены в табл. 5.

Таблица 5

| Испыт. стенд | Длина волны $\lambda$ , см | Имп. мощность $P$ , МВт | Длит. имп. $\tau$ , нс | Длит. фронта, $\tau_f$ , нс |
|--------------|----------------------------|-------------------------|------------------------|-----------------------------|
| Темп-А       | СШП                        | 200                     | 15                     | 1                           |
| Темп-Б       | 3–5                        | до 1000                 | $\sim 1,5 \cdot 10^3$  | $\sim 200$                  |
| ИС-1         | 3–10                       | 500                     | 30                     |                             |
| ИС-2         | 3–10                       | $7 \div 10$             | $(4 \div 6)10^2$       | $150 \div 200$              |

Методика исследований предполагала облучение объектов при различных напряженностях электрического поля СВЧ-излучения. Для этой цели с помощью калибровочных датчиков снималось распределение напряженности электрического поля от расстояния  $L$ , которое и определяло «рабочую зону» с заданными значениями  $E(L)$ . Располагая исследуемые объекты в рабочей зоне на различном расстоянии от рупора, можно реализовать необходимые условия эксперимента. Во избежание экранировки, биологические объекты располагались в контейнерах из СВЧ-прозрачного материала. Ориентация объектов в контейнерах может быть заданной или произвольной, что позволяет в принципе оценивать влияние поляризации излучения.

В качестве биологических объектов при экспериментах на испытательных стендах ИС-1 и ИС-2 были использованы: колорадский жук, семена озимой пшеницы, семена шелковицы. Объекты располагались на различных расстояниях от конического излучающего рупора  $D = 120$  мм. Однотипные объекты облучались одновременно одними и теми же СВЧ-импульсами. В табл. 6 приведены дозы облучения в зависимости от расстояния и числа импульсов

Таблица 6

| № образца       | 1  | 2  | 3  | 4   |
|-----------------|----|----|----|-----|
| Расстояние, см  | 0  | 10 | 50 | 100 |
| Число импульсов | 10 | 3  | 3  | 3   |

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  $\sim 50$  % особей погибает. Эти биологические эффекты не могут быть следствием теплового воздействия из-за очень короткой длительности импульса, большой длины волны (на порядок превышающей размеры объектов) и очень низкого прироста температуры.

Исследование влияния короткоимпульсного мощного СВЧ-излучения на донорскую кровь проводилось на установке Темп-Б. Схема проведения экспериментов показана на рис. 2.

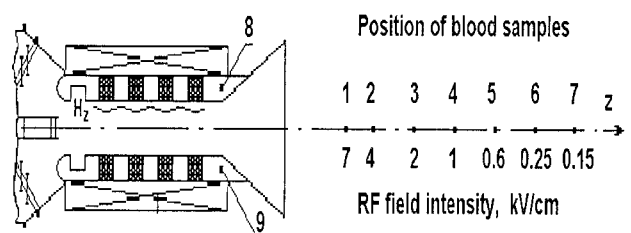


Рис. 2. Схема проведения эксперимента

Исследуемые эритроциты крови брались у 20 доноров, а затем эритроциты каждого донора делились на 10 частей (образцов) по 10 мл и разливались в пенициллиновые флаконы. Семь образцов, с 1-го по 7-й, размещались вдоль оси рупора в областях напря-

женностей СВЧ полей  $E_{из} \approx (7 \cdot 10^3 \div 150) \text{ В} \cdot \text{см}$ , 8-й и 9-й образцы располагались в зоне рентгеновского излучения со средней энергией  $\gamma$ -квантов  $\sim 0,5 \text{ МэВ}$  при экспозиционной дозе 100 рентген за импульс (см. рис. 2). Контролем служил интактный образец крови.

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

Две последние характеристики были получены с помощью электроцитоанализатора 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 повреждений.

Исследования показали, что импульсное СВЧ-излучение высокой интенсивности оказывает биологическое воздействие на эритроциты донора при их изолированном облучении.

Так, исследования значения рН клеточной взвеси позволило выявить снижение этого показателя, что означает закисление среды по сравнению с контрольным образцом. Поведению же осмотической резистентности облученных эритроцитов присуще повышение резистентности этих клеток к гипотоническим растворам хлористого натрия.

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 наличие макроцитоза, т. е. набухание клеток в результате действия СВЧ-излучения. Этот же прибор указывает на изменение электрических свойств эритроцитарных мембран. Так для донора с группой крови А(II) ток и напряжение пробоя составляют  $I_{пр} = 394,8 \text{ мкА}$ ,  $U_{пр} = 0,59 \text{ В}$  соответственно, а для донора с группой В(III) —  $I_{пр} = 405,77 \text{ мкА}$ ,  $U_{пр} = 0,93 \text{ В}$ , при значениях  $U_{пр} = 0,6 \text{ В}$  и  $I_{пр} = 392,07 \text{ мкА}$  — для контрольных образцов.

Исследования относительной вязкости по Освальду облученной взвеси эритроцитов установили, что этот показатель снижен для 60–80 % случаев. Для ротационной вязкости в 75 % случаев наблюдается повышение упругости мембран эритроцитов при напряженности поля излучения  $E_{из} \approx (250 \div 150) \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$ . При этом, эритроцитарная масса имеет стабильные свойства в широком диапазоне нагрузок. Примером этому служат графики ротационной вязкости для 2-х

доноров, приведенные на рис. 3, 4 (группы крови А(II) и В(III) соответственно). Здесь сплошная кривая 1 — контрольная, а пунктирная 2 — для поля  $200 \text{ В/см}$  ( $D$  — ротационная вязкость,  $J$  — модуль сдвига).

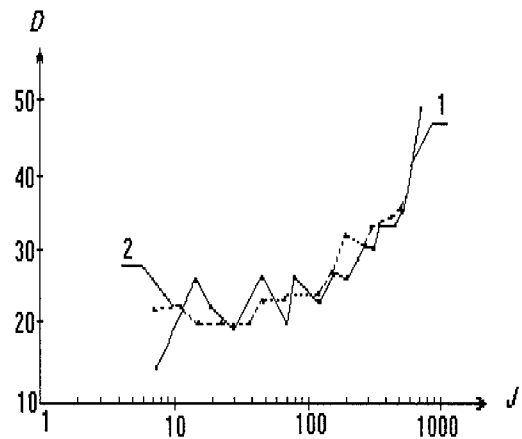


Рис. 3. Зависимость ротационной вязкости от модуля сдвига для донора с группой крови А(II)

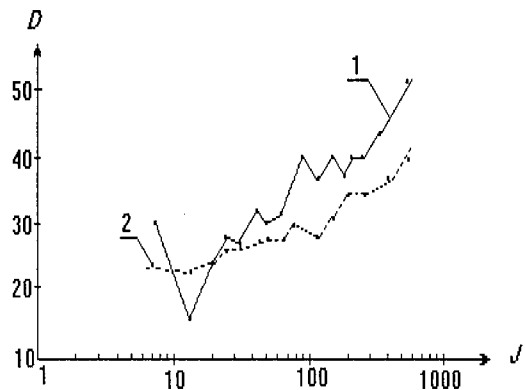


Рис. 4. Зависимость ротационной вязкости от модуля сдвига для донора с группой крови В(III)

Полученные экспериментальные результаты не могут быть объяснены «тепловым» [3] или «резонансным» [9, 10] механизмами, характеризующимися малой интенсивностью СВЧ полей и длительными временами воздействия. В наших экспериментах длительность импульса очень короткая ( $t_{им} \sim 10^{-6} \text{ с}$ ), излучаемая длина волны много больше размеров объекта, а оценка величины нагрева не превышает  $0,01^\circ \text{C}$ . Следовательно, ответственным за результаты воздействия короткоимпульсного мощного СВЧ-излучения на эритроциты донорской крови может быть механизм, вызванный наличием больших значений полей  $E_{из} \approx (250 \div 150) \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$  и скоростью их изменения  $dE/dt \sim 10^{10} \text{ В/с}$ , а не «тепловой» [11, 12].

Анализ данных исследований показал, что:

- при воздействии мощного короткоимпульсного СВЧ-излучения на эритроциты донорской крови проявляется биологический эффект, механизм которого нетепловой (полевой);
- наблюдаются повышения ротационной вязкости, электрорезистентности мембран эритроцитов, объем-

но-плоскостных параметров, снижение рН и относительной вязкости;

- теоретические предпосылки, основанные на этих результатах, позволяют считать перспективным применение мощных импульсных СВЧ-полей для обработки донорской крови на этапах ее криоциклирования с целью создания нового метода консервации.

Одной из особенностей короткоимпульсного ЭМИ большой интенсивности, помимо характеристик, типичных для узкополосных СВЧ-сигналов (длительность, амплитуда поля), является широкий частотный спектр. Такие свойства короткоимпульсного ЭМИ позволяют ожидать наличия нескольких механизмов воздействия («полевой» + «резонансный»). С этой целью авторами были проведены экспериментальные исследования влияния мощного короткоимпульсного ЭМИ на изолированные клетки.

Экспериментальные исследования проводились на сильноточном ускорителе релятивистских электронов «ТЕМП-А». ЭМИ генерировалось за счет возбуждения штыревой антенны короткоимпульсным сильноточным релятивистским электронным пучком с параметрами:  $E = 0,5\text{--}1,0$  МэВ,  $I = 5\text{--}10$  кА, длительностью до 15 нс, с фронтом нарастания  $\sim 0,5\text{--}1$  нс.

В экспериментах использовалась штыревая антенна с длиной 3 м и диаметрами 10–20 мм (рис. 5). Здесь высокоэнергетичный сильноточный электронный пучок формируется взрывоэмиссионным диодом, катод 1 и анод 2 которого расположены аксиально внутри солениоида 3. Пучок попадает на коллектор 5, к которому подсоединена штыревая антенна 7. При условии моноэнергетичности частиц пучка происходит возбуждение и формирование переходной характеристики антенны, представляющей собой около двух периодов импульсов несинусоидальной формы (рис. 5). Поле излучения регистрировалось ТЕМ-рупором 8, расположенным на расстоянии около 5 м от середины излучающей антенны. Параметры тока пучка контролировались поясом Роговского 4.

Объектом исследования служила суспензия клеток печени эмбриона человека (9 недель), помещенная в прозрачные для излучения капсулы, которые располагались в зоне ЭМИ напряженностью поля  $\sim 1$  кВ/см. Данный материал получался из эмбриональной ткани (печени), погруженной в раствор Хэнкса в присутствии антибиотика и аккуратно гомогенизированной в гомогенизаторе Поттера, после чего трижды отмывался в физиологической среде. В полученную таким образом суспензию добавляли криопротектор ДМС (диметилсульфамид) в 5%-й концентрации. После эквilibрации суспензия помещалась в криоконтейнер и подвергалась двухступенчатому замораживанию с индуцированной кристаллизацией.

Исследования проводились на размороженном материале (использовался быстрый отогрев от  $-196^\circ\text{C}$  до  $0^\circ\text{C}$  на  $37^\circ\text{C}$  водяной бане). Циклическое замораживание оттаивание (криоциклирование) производилось погружением пробы в жидкий азот с последующим оттаиванием до  $0^\circ\text{C}$  на  $37^\circ\text{C}$  водяной бане. Скорость

замораживания при этом превышала  $270$  градусов/мин. Проба В была предварительно подвергнута 4-кратному криоциклированию, а проба А циклированию не подвергалась. Каждая проба облучалась от 10 до 20 импульсов.

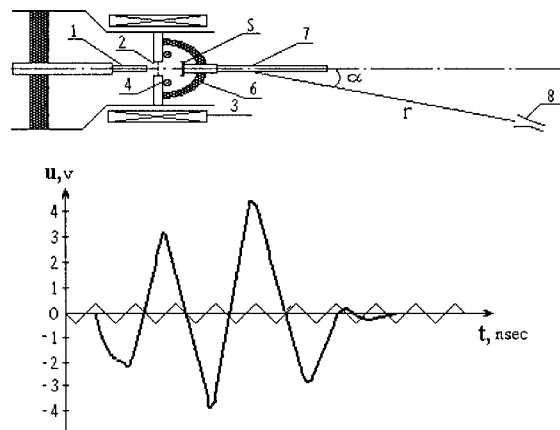


Рис. 5. Схема установки электронно-пучковой антенны и временная диаграмма излучения

Для интерпретации экспериментальных результатов крайне важен был выбор адекватных критериев при действии видеоимпульса большой интенсивности на суспензию клеток печени эмбриона человека (9-неделя). Оценка жизнеспособности клеток до и после воздействия изучалось методом суправивального окрашивания метиленовым синим. Наиболее чувствительным параметром, характеризующим нарушение структуры липидных комплексов биологических мембран, является реакция свободнорадикального перекисного окисления. Одним из методов, который позволяет обнаружить продукты свободно-радикальной природы, является метод хемилюминесценции, основанный на измерении интенсивности продуктов с возбужденными электронными уровнями, которые образуются в результате рекомбинации радикалов. Измерения проводились на квантометрической установке с ФЭУ140, в термостатируемом при  $37^\circ\text{C}$  боксе. Кинетика хемилюминесцентных реакций изучалась по трем основным параметрам:

- значению интенсивности максимальной вспышки, которое позволяет судить о наличии продуктов перекисного окисления в субстрате; величина амплитуды этого значения прямо пропорциональна окисляемости липидов и обратно пропорциональна содержанию природных антиоксидантов;
- конечное значение соответствует количеству продуктов антиоксидантной природы;
- значение светосуммы соответствует общему количеству продуктов перекисного окисления, прореагировавших с определенным количеством индуктанта.

Полученные данные в результате облучения проб В приведены в табл. 7, в которой приняты следующие обозначения:

$I_i$  — интенсивность максимальной вспышки индуцированной перекисью водорода хемилюминесценции клеток печени эмбриона;

$I_f$  — интенсивность конечного значения на 4 мин. измерения;

$\Sigma$  — светосумма за 4 мин. измерения;

$V$  — выживаемость = (число живых клеток после облучения/число живых клеток изначально)  $\times 100\%$ .

Таблица 7

|                                 | $I_i$ | $I_f$ | $\Sigma$        | $V$   |
|---------------------------------|-------|-------|-----------------|-------|
| 3% $H_2O_2$ + K' hep control    | 54    | 5,1   | $22 \cdot 10^2$ | 100 % |
| 3% $H_2O_2$ + K' hep + 10 shots | 69    | 6,2   | $29 \cdot 10^2$ | 73 %  |
| 3% $H_2O_2$ + K' hep + 20 shots | 87    | 15    | $46 \cdot 10^2$ | 58 %  |

Из таблицы следует, что процент выживаемости клеток, подвергнутых действию видеоимпульса большой мощности, уменьшается пропорционально дозе воздействия. Отмечается также высокая интенсивность всех параметров хемилюминесценции при всех дозах воздействия относительно этих же значений в норме. Чем ниже процент жизнеспособных клеток, тем выше интенсивность свободно-радикального перекисного окисления. Этот факт свидетельствует о том, что в данном биосубстрате содержатся активные группы — эмиттеры с высоким квантовым выходом, по-видимому, за счет нарушения целостности структуры мембран клеток (образования пор).

Интересные результаты по нетепловому электромагнитному воздействию на семена ячменя в сравнении с химической обработкой (протравление) были получены при комплексных исследованиях биологического действия импульсных ЭМП.

В данных экспериментах использовались два типа импульсных ЭМП:

СШП — излучение наносекундной длительности;

ЭМП — микросекундной длительности.

Генерация СШП — осуществлялась по схеме, аналогичной рис. 5, прямым возбуждением ТЕМ-рупора сильноточным релятивистским электронным пучком с параметрами:  $E_b \sim 0,5 \div 1$  МэВ;  $I_b \sim 5 \div 10$  кА;  $t \sim 15$  нс. Излученный сигнал имел вид, близкий к  $\delta$ -функции с длительностью  $\sim 1-2$  нс.

ЭМП-микросекундной длительности реализуется путем разрядки генератора импульсных напряжений на плоский конденсатор и имеет вид затухающей синусоиды общей длительностью  $\sim 12$  мкс и периодом  $T = 1,2$  мкс.

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  $\sim 16$  кВ/см. В первом случае исследовалась и зависимость от количества импульсов. Величина интегральной дозы излучения определялась числом воздействующих импульсов (1, 5, 10).

Методикой экспериментов предполагалось облучение семян различными интегральными дозами излучений с последующим лабораторным и полевым анализом результатов, а также сравнением с контрольными группами растений и результатами применения стандартных протравителей.

Результаты лабораторных и полевых испытаний в условиях вегетации 2001 г. семян ячменя и яровой пшеницы, зараженных головней, приведены на гистограмме рис. 6 и показали, что:

— 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 пораженности растений головней в результате облучения электрическими импульсами высокой интенсивности показатель имел значение ниже характерного для стандартной обработки протравителем.

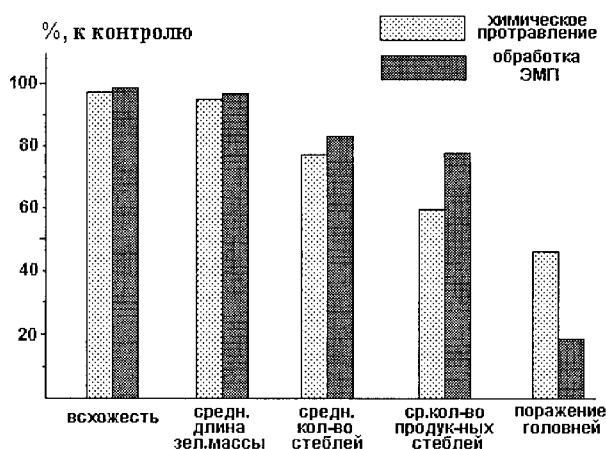


Рис. 6. Сравнительная гистограмма полевых испытаний в условиях вегетации 2001 г. семян ячменя

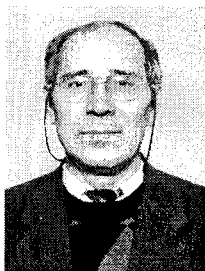
Следует отметить, что данные биологические эффекты, проявившиеся при воздействии импульсных ЭМП, вызваны «нетепловым» механизмом, а скорее всего большей амплитудой напряженности поля  $E$  и скоростью его нарастания  $dE/dt$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования и полевые испытания в условиях вегетации 2001 г. семян ячменя и яровой пшеницы, зараженных головней, показали, что обработка импульсным ЭМП дает положительные результаты в сравнении с химическим протравлением. По таким же параметрам, как среднее количество, продуктивных стеблей выше примерно на 10 %, а по поражению головней — в 2–3 раза ниже.

**Литература:** 1. 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. 2. Минин Б. СВЧ и безопасность человека. — М.: Сов. радио, 1974. — 352 с. 3. Рогов И.А., Некрутман С.В. СВЧ нагрев пищевых продуктов. — М.: Агропромиздат, 1986. — 351 с. 4. Saunders R.D. et al // Radiat. Biol. 1981. V. 39, 16. — P. 587–596. 5. Jiang H.B. // 33 Ann. Meet. of the Rad. Res. Society, Los Angeles. CA (USA), 5–9 May 1985. — P. 23. 6. Шапошникова Е.С. и др. // Сб. тр. Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных ЭМП диапазона радиочастот. — М., 1990. — С. 60–66. 7. Шапошникова Е.С. и др. // Сб. тр. Гигиенические аспекты и биологическое действие модулированных

ЭМП диапазона радиочастот. — М., 1990. — С. 67–74.  
8. Африканова Е.А., Григорьев Ю.Г. Радиационная биология. // Радиоэкология. — 1996. Т. 36. — Вып. 5. — С. 691–699.  
9. Девятков Н.Д. и др. Миллиметровые волны и их роль в процессах жизнедеятельности. — М.: Радио и связь. 1991. — 168 с.  
10. Бецкий О.В., Девятков Н.Д. Электромагнитные миллиметровые волны и живые организмы // Радиотехника. 1996. № 9. Биомедицинская радиоэлектроника, № 3. — С. 4–11.  
11. Лонин Ю.Ф., Пушкарь Н.С., Харченко И.Ф. и др. Эффекты биологического действия короткоимпульсного СВЧ-излучения большой интенсивности на эритроциты донорской крови // Материалы 4-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» Севастополь, Крым, Украина, 15–18 сентября 1994 г. Т. 1. — С. 200–203.  
12. Lonin Yu.F., Dikiy N.P., Kharchenko I.F., Ermolenko V.V. et al. Nonthermal Effects Observed after Irradiating Donor Blood Erythrocytes by a High-Power Short-Pulse Electromagnetic Field // First International Symposium on Nonthermal Medical/Biological Treatments Using Electromagnetic Fields and Ionized Gases, April 12–14, 1999, Waterside Marriott, Norfolk, Virginia, — P. 90.



Поступила в редколлегию 08.07.2004

**Лонин Юрий Федорович**, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела ННЦ «Харьковский физико-технический институт». Область научных интересов: физика плазмы, плазменная электроника, биологическое действие электромагнитных полей.



**Егоров Алексей Михайлович**, д-р физ.-мат. наук, первый заместитель Генерального директора ННЦ «Харьковский физико-технический институт», действительный член АН ПРЭ. Область научных интересов: ускорители частиц, физика плазмы и плазменная электроника и прикладные проблемы.



**Лонин Алексей Юрьевич**, канд. фарм. наук, старший научный сотрудник ННЦ «Харьковский физико-технический институт». Область научных интересов: биология, фармация, биологические эффекты электромагнитных излучений.



**Чумаков Владимир Иванович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой РЭУ ХНУРЭ, действительный член АН ПРЭ. Область научных интересов: генерирование мощных импульсных электромагнитных полей и прикладные проблемы.