

На правах рукописи

ИГОЛКИНА
Юлия Владимировна

**БИОЛОГИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ РАДИОЧАСТОТНОГО
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПО ПОКАЗАТЕЛЮ
АКТИВНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ИНФУЗОРИЙ**

03.02.08 – экология (биология)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Москва – 2010

Работа выполнена	Обнинский институт атомной энергетики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»
Научный руководитель: к.б.н., доцент	Сарапульцева Елена Игоревна
Официальные оппоненты:	
Д.б.н., профессор МГУ им. М.В. Ломоносова	Филенко Олег Федорович
Д.м.н., заведующий лабораторией радиопатологии МРНЦ РАМН	Жаворонков Леонид Петрович
Ведущая организация	Калужский государственный педагогический университет им. К.Э. Циолковского

Защита диссертации состоится «11» февраля 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 501.001.55 при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119992, Россия, Москва, Ленинские горы, д.1, стр. 12, ком.398. Биологический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

Автореферат разослан « ___ » ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.б.н.

Н.В. Карташева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема оценки опасности биологического действия электромагнитных полей (ЭМП) и их экологического нормирования приобрела в последние годы особую актуальность. В Санитарных нормах и правилах России (ГОСТ 12.1.006-84) при работе с источниками ЭМП воздействие радиочастотного (РЧ)-излучения (300 МГц – 300 ГГц) нормируют по плотности потока энергии (ППЭ). В качестве предельно допустимого уровня (ПДУ) электромагнитного излучения (ЭМИ) для населения принимается дробная величина от минимального уровня ЭМП, способная вызвать у человека какую-либо реакцию, превосходящую нормальный адаптивный ответ организма в конкретных условиях воздействия излучения. Нормативы в России установлены очень жесткими и отличаются от американских и европейских в 10 – 100 раз (в России ПДУ для населения, профессионально не контактирующего с источниками ЭМИ, принято считать 10 мкВт/см^2 (СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03); в США – 100 мкВт/см^2).

Вопрос биобезопасности электромагнитных излучений для природных экосистем в настоящее время остается открытым. В связи с ускорением темпов индустриального развития общества прослеживается тенденция увеличения использования электромагнитной энергии в хозяйственной деятельности человека и прогнозируется увеличение электромагнитного загрязнения окружающей среды. Поэтому разработка и введение в практику нормативно-правового регулирования электромагнитного воздействия на биоту позволит предотвратить загрязнение окружающей среды и сокращение видового биоразнообразия.

Цель и задачи исследования

Целью работы является оценка биологического действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения радиочастотного диапазона с разной плотностью потока энергии по влиянию на функцию движения инфузорий *Spirostomum ambiguum*.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие конкретные **задачи**:

1. Исследовать изменения двигательной активности инфузорий в условиях разного по продолжительности низкоинтенсивного электромагнитного воздействия с несущими частотами 1 и 10 ГГц при плотности потока энергии 5, 10, и 50 мкВт/см^2 .

2. Найти зависимость изменения двигательной активности инфузорий от параметров электромагнитного поля (несущей частоты, плотности потока энергии и времени экспозиции).

3. Исследовать в ряду поколений изменения двигательной активности инфузорий после воздействия на них электромагнитного излучения с частотой 10 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см².

4. Оценить допустимое (безопасное) время нахождения инфузорий в электромагнитном поле с разной несущей частотой и плотностью потока энергии.

5. Обосновать возможный механизм действия низкоинтенсивного радиочастотного электромагнитного излучения, вызывающий изменение двигательной активности инфузорий.

Положения, выносимые на защиту

1. Электромагнитное излучение нетепловой интенсивности на частоте мобильной связи (1 ГГц), а также радаров военно-промышленного комплекса, радио- и спутникового телевидения (10 ГГц) с плотностью потока энергии на предельно-допустимом в России уровне, а также в 2 раза ниже и в 5 раз выше, вызывает значимый эффект снижения двигательной активности инфузорий.

2. Эффект характеризуется: а) наличием безопасного (допустимого) периода нахождения в электромагнитном поле, б) пороговым проявлением и зависимостью наступления «порога» от плотности потока электромагнитной энергии и в) независимостью после достижения «порога» величины эффекта от времени экспозиции в электромагнитном поле в широком временном диапазоне.

3. Биологический эффект действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения передается в ряду поколений вегетативно размножающихся инфузорий.

4. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нормативов электромагнитного воздействия на биоту.

Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые представлен способ регистрации биологического действия слабых электромагнитных излучений радиочастотного диапазона путем наблюдения за изменением поведенческой реакции инфузорий.

Выявлен негативный эффект действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения радиочастотного диапазона с плотностью потока энергии в два раза ниже ПДУ, принятого в России, проявляющийся в снижении двигательной активности у исследуемых инфузорий.

Установлены безопасные (допустимые) периоды нахождения инфузорий в электромагнитном поле с разной плотностью потока энергии, продолжительность которых зависит от времени экспозиции.

Впервые показан одинаковый характер и степень нарушения функции движения инфузорий при радиочастотном электромагнитном воздействии с частотами, отличающимися в десять раз (1 и 10 ГГц).

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть рекомендованы для регламентирования норм электромагнитного воздействия на биоту.

Апробация работы. Результаты исследования доложены на Международ. научной конфер. «Полярное сияние-2003», С.Пб; III научно-технич. конфер. «Научная сессия МИФИ-2004, М.; II Междунар.конфер. «Биотехнология – охране окружающей среды» М.: МГУ, 2004; IV Междунар. конфер. «Электромагнитные излучения в биологии: БИО-ЭМИ-2008» Калуга, 2008; III Всерос. конфер. «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы», Борок, 2008; VIII Междун. научной конферен. «Сахаровские чтения-2008». Минск, 2008; Всерос. конфер. «Экотоксикология-2009» с элементами научной школы для молодежи, Пушкино, 2009 (*премия за победу в конкурсе научных работ*); XIV Междунар. школе-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI в.», Пушкино, 2010; Междун.школе-конференции молодых ученых «Биология внутренних вод», Борок, 2010, 3^d European IRPA 2010 (Международный конгресс по радиационной защите), Helsinki, Finland on 14-18 June 2010.

Опубликовано 32 печатные работы, в том числе в журналах, рекомендованных ВАК – 9, в других рецензируемых журналах – 1, в материалах конференций – 22.

Диссертация апробирована на межкафедральном научном семинаре ИАТЭ НИЯУ МИФИ 04 июня 2010 г. и на заседании кафедры гидробиологии биологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова 02 ноября 2010 г.

Структура работы. Диссертационная работа изложена на 197 страницах машинописного текста. Содержит: введение, обзор литературы, материалы и методы исследования, результаты и их обсуждение, заключение, выводы, список используемых источников, содержащий 76 российских и 25 зарубежных публикаций. Полученные результаты представлены в приложении на 90 листах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Установки для электромагнитного воздействия на биологические тест-объекты. В работе использованы специально разработанные инженером кафедры экологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ к.т.н. А.В.Литовченко (Иголкина, Сарапульцева, Литовченко, 2009; Sarapultseva, Igolkina, Litovchenko, 2009) установки, в которых применены серийные маломощные генераторы РЧ сигнала. Создание необходимых уровней ППЭ достигали за счет использования рупорных антенн, имеющих узкую диаграмму направленности.

Для облучения на несущей частоте 1 ГГц использована плоская спиральная антенна, расположенная на открытом торце коаксиального четвертьволнового резонатора, работающая от генератора Р2-52. В установке для облучения на частоте 10 ГГц применена рупорная пирамидальная линзовая антенна, работающая от генератора Г4-109. Калибровочные измерения ППЭ проведены с помощью приемника ПЗ-18. Погрешность измерения ППЭ не превышает 15-20%.

Тест-объект. В качестве тест-объекта использовали лабораторную популяцию инфузорий *Spirostomum ambiguum*. Культивирование осуществляли в биологических пробирках при температуре $20 \pm 1^\circ\text{C}$ в водопроводной воде, которую отстаивали и отфильтровывали через обеззоленный фильтр. Пересев культуры и кормление пищевыми дрожжами осуществляли раз в неделю.

Метод оценки двигательной активности спиростом. Количественную оценку изменения двигательной активности у спиростом проводили методом, аналогичным методу «открытого поля». Для этого, в соответствии с имеющимися методическими разработками проф. МГУ Н.А. Тушмаловой (1983), спиростом поодиночно помещали в специальную пластиковую камеру с ячейками диаметром 5 мм и глубиной 1-2 мм. На окуляр микроскопа МБС-10 наносили визир в виде двух перпендикулярно пересекающихся линий. Изменение двигательной активности оценивали по числу пересечений каждой спиростомой визиров окуляра микроскопа за единицу времени (1 мин).

Одновременно фиксировали количество особей с морфологической патологией. Она проявлялась в форме «вертячек», когда поступательное движение спиростом практически прекращалось и простейшие вращались на месте и судорожных сжатий тела, когда их форма напоминала шар.

Оценка темпа деления облученных спиростом. Для учета темпа деления и жизнеспособности контрольных и облученных спиростом размещали поодиночно в 96-луночные планшеты и ежедневно регистрировали гибель и деление клеток в «индивидуальных линиях». Если спиростома делилась, то для дальнейшего культивирования оставляли одну из сестринских клеток, а вторую удаляли. В случае гибели особи, линию считали «погибшей». Определяли долю индивидуальных линий, прекративших свое существование на каждый день наблюдения.

Облучение спиростом в ЭМП с разными ППЭ. Воздействию ЭМП инфузорий подвергали в открытых пластиковых чашках Петри диаметром 4 см в слое воды не более 0,34 см. Спиростом для облучения брали из массовой культуры. Плотность популяции составляла примерно 30–50 особей/мл. Задаваемая экспозиция в ЭМП представлена в табл. 1.

Таблица 1

Режимы облучения *Sp. ambigua* в электромагнитном поле

Частота облучения, ГГц	Плотность потока энергии, мкВт/см ²	Время экспозиции, ч
10	5	1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 11; 12; 14; 16
	10	0,25; 0,50; 0,75; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10
	50	0,01; 0,05; 0,08; 0,16; 0,25; 0,33; 0,50; 0,75; 1
1	5	5; 7; 8; 9; 10
	10	0,25; 0,50; 0,75; 1; 2; 3; 4; 6; 8; 10
	50	0,05; 0,08; 0,16; 0,33; 0,5; 0,75; 1

Контрольную культуру помещали в аналогичные условия, но без воздействия на нее электромагнитного поля. Сразу после экспозиции производили количественную оценку изменения двигательной активности индивидуально у каждой опытной и контрольной спиростомы. Проведено по 10 независимых серий экспериментов для каждой частоты и ППЭ. В каждой отдельной выборке было по 20 спиростом.

Длительные наблюдения за простейшими. После воздействия ЭМП инфузорий длительно культивировали в виде массовой культуры в биологических пробирках в 15 мл необлученной воды, обновляя 1/3 воды еженедельно. Кормление осуществляли раз в неделю. Оценка изменения двигательной активности производили на 4, 14, 21 и 30 сут у инфузорий, отобранных случайным образом.

Облучение воды и анализ опосредованного действия ЭМП на изменение двигательной активности спиростом. Воду, подготовленную вышеописанным способом для культивирования спиростом, помещали в открытых пластиковых чашках Петри диаметром 4 см в ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 50 мкВт/см² на 10 мин, 1, 3 и 6 ч. Высота водяного столба не превышала 0,34 см. Сразу после облучения в воду вносили необлученную культуру спиростом в концентрации около 30–50 особей/мл и оставляли на 1 ч. Затем производили оценку изменения двигательной активности в контрольных и опытных группах. Контрольные образцы представляли собой необлученную культуру спиростом, а также культуру, непосредственно облученную в течение 1 ч с ППЭ 50 мкВт/см² на частоте 1 ГГц. Проведено три независимые серии экспериментов.

Измерение рН водной среды. Измерение кислотности водной среды проводили на рН-метре (Анион-4110, Россия) до облучения (контроль) и через 10 мин, 1, 3 и 6 ч экспозиции воды в ЭМП. Проведено три независимые серии измерений.

Статистическая обработка полученных данных. Всего в экспериментах протестировано около 4600 инфузорий.

Результаты обработаны с помощью статистической программы Microsoft®Excel'2003 SR-2 Origin®.

Для проверки гипотезы о значимости различий полученных данных в сериях экспериментов были использованы критерий T Крамера-Уэлча и критерий Вилкоксона (Манна-Уитни). Значение модуля статистики T сравнивали с граничным значением, равным: $T_{кр.}(p < 0,05) = 1,96$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Изменение двигательной активности спиростом под действием постоянного ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 5 мкВт/см² представлено на рис.1.

Видно, что в течение 5-ти и даже 7-и часовой экспозиции различий в двигательной активности контрольных и облученных спиростом не наблюдается. Снижение двигательной активности облученных особей примерно на 40% происходит скачкообразно при увеличении времени экспозиции до 8 ч. Далее величина эффект сохраняется на одном и том же уровне вплоть до 10 ч экспозиции.

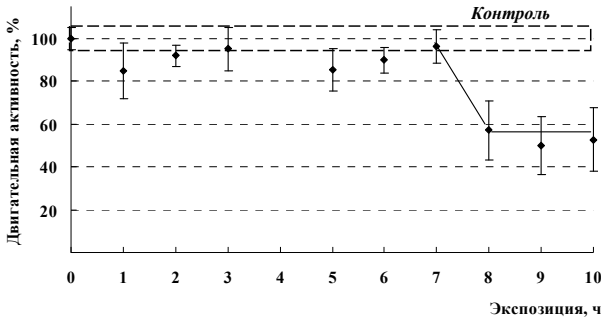


Рис. 1. Изменение двигательной активности у спиростом (в % относительно контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с частотой 1 ГГц, ППЭ 5 мкВт/см² и экспозицией до 10 ч

Изменение двигательной активности спиростом под действием постоянного ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см² представлено на рис.2. Напомним, что указанное значение ППЭ является предельно допустимым уровнем электромагнитного воздействия, принятого в России (СанПиН 2.1.8/2.2.4.1190-03). Как показано на рис. 2б, после 15-ти и 30-минутного нахождения в ЭМП различий в двигательной активности у облученных и контрольных спиростом не выявляется. Снижение двигательной активности приблизительно на 40% от контрольного уровня происходит скачкообразно при достижении 45-минутной экспозиции (рис.2б).

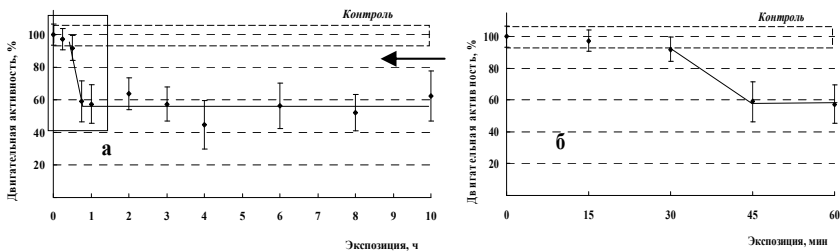


Рис. 2. Изменение двигательной активности у спиростом (в % относительно контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с ППЭ 10 мкВт/см², частотой 1 ГГц и экспозицией до 10 ч (а) и до 60 мин (б)

При дальнейшем увеличении экспозиции величина эффекта сохраняется на одном и том же уровне вплоть до 10 ч экспозиции (рис. 2а).

Изменение двигательной активности спиростом под действием ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 50 мкВт/см² представлено на рис. 3. Как и в предыдущих опытах, на рис.3 наблюдается похожая закономерность изменения двигательной активности у спиростом, находящихся в ЭМП. В некотором временном диапазоне двигательная активность простейших соизмерима контрольному уровню, затем происходит скачкообразный переход подопытных особей на новый функциональный уровень, который характеризуется снижением двигательной активности примерно на 40%. После достижения «порога» величина эффекта не изменяется в широком временном диапазоне.

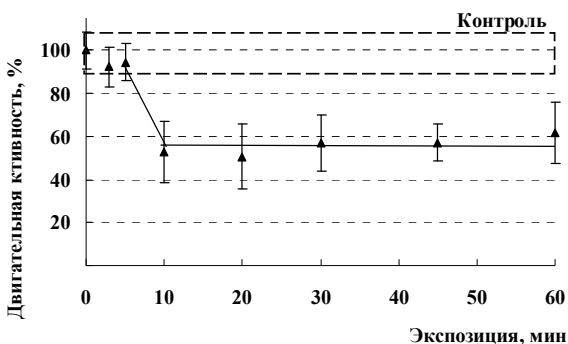


Рис. 3. Изменение двигательной активности у спиростом (в % относительно контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с частотой 1 ГГц, ППЭ 50 мкВт/см² и экспозицией до 60 мин

Итак, у протестированных гидробионтов после непрерывно генерируемого низкоинтенсивного электромагнитного излучения на частоте мобильной связи (1 ГГц) обнаружено выраженное нарушение двигательной активности. При этом выявлено наличие порога, зависящего от плотности потока энергии (рис.4).

При воздействии с частотой 1 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см², которую оценивают как ПДУ, продолжительность времени «безопасного» нахождения простейших в ЭМП составляла 45 мин. При ППЭ 5 мкВт/см², т.е. в 2 раза более низкой, чем ПДУ, период безопасного времени составлял 8 ч. При ППЭ 50 мкВт/см² безопасный период непрерывного нахождения инфузорий в ЭМП составлял не более 10 мин. Во всех случаях при сверхпороговых экспозициях степень изменения двигательной активности у облученных спиростом была очень близкой.

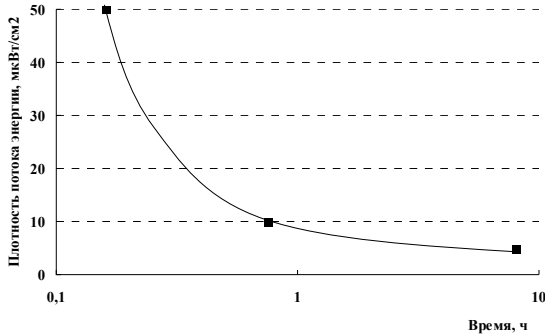


Рис. 4. Зависимость между временем (в полулогарифмическом масштабе) наступления порогового эффекта снижения двигательной активности и плотностью потока энергии при нахождении спиростом в электромагнитном поле с частотой 1 ГГц

Это явление обнаружено при радиочастотном облучении простейших впервые. На наш взгляд, «пороговый эффект» вызван весьма нетривиальными причинами, о которых поговорим ниже.

Эффект проявлялся не только в снижении двигательной активности облученных спиростом, но и в появлении таких ярко выраженных функциональных расстройств как реакции-«предвестники гибели» – судорожные подергивания тела, изменение характера движения от «прямолинейного» до «верчения», попятные движения или полная неподвижность спиростом. На рис.5 показаны физиологическая норма (рис.5а), характерная для контрольной группы простейших и наблюдаемая нами морфологическая патология движения спиростом, длительно находящихся в ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 10 МкВт/см². Характер патологии был однотипным при увеличении экспозиции от 1 до 6 ч и проявлялся в виде судорожных сжатий тела простейших (рис.5б) или «вертячек» (рис.5в).

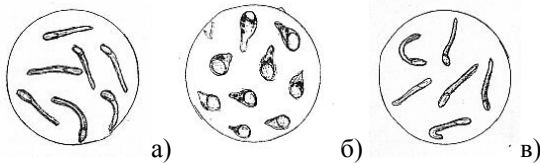


Рис. 5. Физиологическая норма (а) и наблюдаемая нами морфологическая патология спиростом: сжатия (б) и вертячки (в)

Сразу после воздействия у части спиростом, составляющей около 5-7% от протестированных особей, наблюдали морфологические патологии движения. На рис.6 приведены результаты количественного учета случаев морфологической патологии у спиростом на 14 сут после нахождения в ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см².

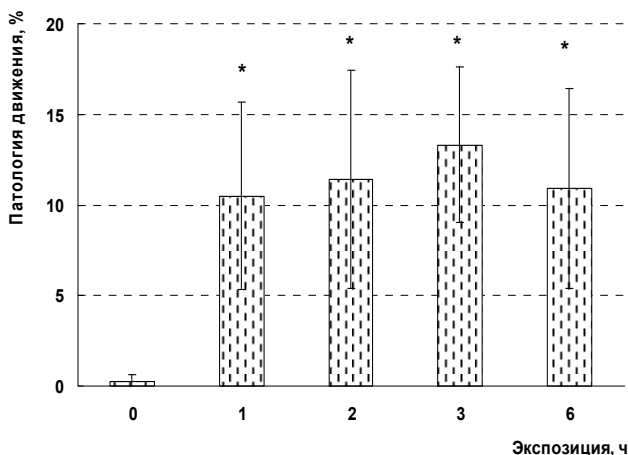


Рис. 6. Изменение частоты встречаемости морфологической патологии у спиростом, находящихся в ЭМП с частотой 1 ГГц, ППЭ 10 мкВт/см² и экспозицией от 1 до 6 ч в трех сериях опытов (в % к исходному количеству особей) на 14 сут после воздействия

Видно, что количество аномалий движения достоверно выше, чем в контроле. При наблюдении в течение 30 сут за «индивидуальными» линиями контрольных и подвергшихся воздействию ЭМП с частотой 1 ГГц, ППЭ 10 мкВт/см² с экспозицией до 6 ч спиростом после сравнительно непродолжительного периода отсутствия делений, связанного с переходом на индивидуальное культивирование (лаг-фаза), большинство инфузорий начинало активно размножаться, причем примерно с одинаковой частотой. Изменения жизнеспособности после воздействия соответствовало спонтанному уровню гибели простейших и не превышало к 30-м сут 10–15%. В табл. 2 представлены статистические данные, демонстрирующие сохранение темпов деления подвергшихся ЭМ воздействию спиростом.

Таблица 2

Изменение темпа деления спиростом в индивидуальных линиях к 30-м сут наблюдения в контроле и после электромагнитного воздействия с частотой 1 ГГц, ППЭ 10 мкВт/см² и экспозицией до 6 ч при $p \leq 0.05$

Экспозиция, ч	Число линий, n	Темп деления, M	SE	t_d	$t_{st} = 1.99$
0	48	13.5	3.0		
1	17	12.0	2.7	0.38	
2	21	12.2	2.7	0.33	
3	24	14.0	2.9	0.12	
6	20	10.8	4.2	1.20	

Изменение двигательной активности спиростом при нахождении в ЭМП с частотой 10 ГГц и ППЭ 5 мкВт/см² представлено на рис. 7.

Хорошо видно, что изменение двигательной активности у спиростом, находящихся в ЭМП как с частотой 1, так и 10 ГГц, имеет сходную закономерность.

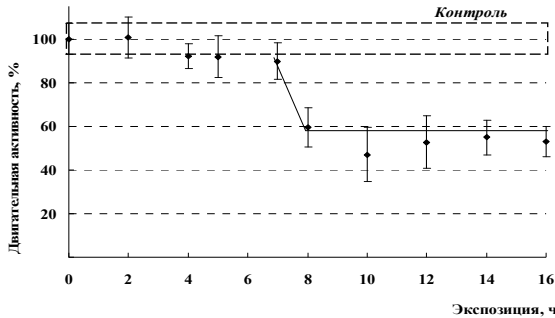


Рис. 7. Изменение двигательной активности спиростом (в % относительно контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с частотой 10 ГГц, ППЭ 5 мкВт/см² и экспозицией до 16 ч

Так ЭМИ с ППЭ 5 мкВт/см² вплоть до 8-ми часовой экспозиции не вызывает изменение двигательной активности спиростом по сравнению с неподвергающимся воздействию контролем. Однако, как и на частоте 1 ГГц 8-часовая экспозиция приводит к пороговому снижению двигательной активности на 40%. При дальнейшем пре-

бывании простейших в ЭМП вплоть до 16 ч изменения величины эффекта не происходит.

Изменение двигательной активности спиростом под действием ЭМП с частотой 10 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см² представлено на рис. 8.

Рис.8б демонстрирует отсутствие эффекта при 15-ти и 30-минутной экспозиции. Снижение двигательной активности приблизительно на 40% происходит при достижении 45-минутной экспозиции. Далее эффект сохраняется на одном и том же уровне вплоть до 10 ч экспозиции (рис. 8а).

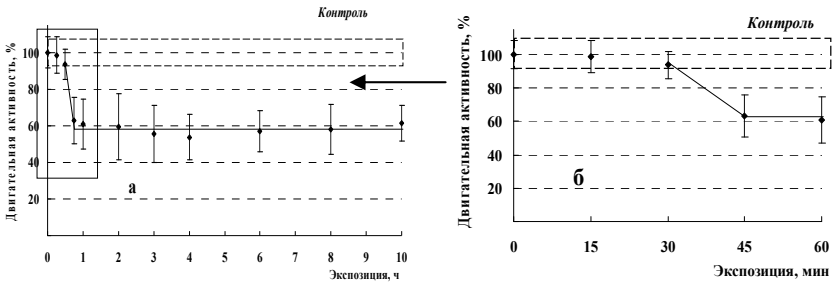


Рис. 8. Изменение двигательной активности спиростом (в % от контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с частотой 10 ГГц, ППЭ 10 мкВт/см², экспозицией до 10 ч (а) и до 60 мин (б)

Изменение двигательной активности спиростом при нахождении в ЭМП с частотой 10 ГГц и ППЭ 50 мкВт/см² представлено на рис. 9.

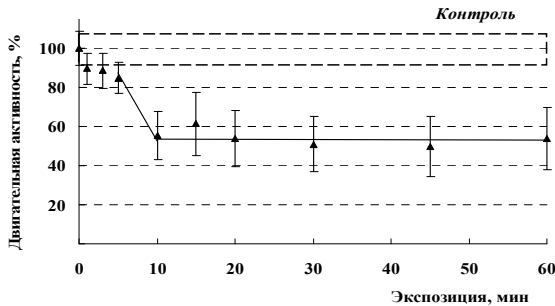


Рис. 9. Изменение двигательной активности спиростом (в % относительно контроля с квадратичной ошибкой) при нахождении в ЭМП с частотой 10 ГГц, ППЭ 50 мкВт/см² и экспозицией до 60 мин

И здесь, как и ранее, наблюдается похожая закономерность. 10-минутная экспозиция приводит к скачкообразному переходу простейших на новый уровень функционирования, который ниже контроля примерно на 40%.

Итак, нами впервые показано, что электромагнитное излучение на частоте радиовещания и спутникового телевидения (10 ГГц) может вызывать выраженное нарушение двигательной активности у простейших. Как видим, зависимость снижения двигательной активности после облучения спиростом на частоте 10 ГГц имеет характерные особенности, аналогичные эффекту облучения на частоте 1 ГГц. Причем и здесь длительность «запаздывания» порога находится в обратной зависимости от величины ППЭ. Сокращение времени безопасного нахождения простейших в ЭМП практически в 48 раз с 8 ч до 10 мин при увеличении ППЭ от 5 до 50 мкВт/см² наглядно демонстрирует зависимость эффекта от ППЭ (рис.4). И еще одна особенность – снижение двигательной активности оказывается практически одинаковым при облучении на частотах 1 и 10 ГГц, примерно на 40% ниже уровня двигательной активности у контрольных групп спиростом.

Происходит, на наш взгляд, триггерный эффект, когда после достижения влияющим фактором определенного уровня система переходит из одного устойчивого состояния в другое и в дальнейшем не реагирует на изменение уровня влияющего фактора. Возникает вопрос: какова же природа этого НБФ? Сразу же можно исключить повышение температуры, поскольку, например, 10 мкВт/см², что соответствует поступлению всего 24 микрокалорий на квадратный сантиметр в секунду, слишком незначительная энергия для нагрева воды в открытой кювете. С этой точки зрения представляет интерес ряд работ (Петросян В.И. и др. 2005, 2006), в которых указываются частоты собственных молекулярных колебаний H₂O, ее гексагональных фрагментов (H₂O)₆, а также более крупных образований – фрактальных кластеры 6(H₂O)₆, которые имеют собственную частоту 1 ГГц. При этом авторы обнаруживают возбуждение собственного излучения воды после ее облучения с частотой 65 ГГц. Связывают это с синхронизацией и поляризацией собственных молекулярных колебаний, наведенных внешним излучением. Вполне возможно, что в процессе синхронизации молекулярных колебаний происходит диссоциация молекул воды на ионы H и OH, что может привести к появлению одноатомного кислорода.

В свете этих рассуждений весьма примечательны полученные нами результаты. Так, при ППЭ = 5 мкВт/см² на частоте 1 ГГц время перехода через порог увеличилось почти в 10 раз по сравнению со временем перехода при ППЭ = 10 мкВт/см². Практически та же самая картина наблюдается и при облучении спиростом на частоте 10 ГГц. Надо подчеркнуть, что здесь так же, как и в вышеописанном эксперименте, отсутствует медленное снижение двигательной активности по мере приближения (по времени) к переходу через порог.

И как первый шаг к прояснению механизма биологического действия низкоинтенсивных электромагнитных воздействий на организм – оценка наследования выявленного нами эффекта снижения двигательной активности у спиростом.

Наследование биологического эффекта в ряду поколений простейших. На рис. 10 представлены зависимости изменения двигательной активности спиростом на 4, 14, 21 и 30-е сутки после электромагнитного воздействия с частотой 10 ГГц и ППЭ 10 мкВт/см².

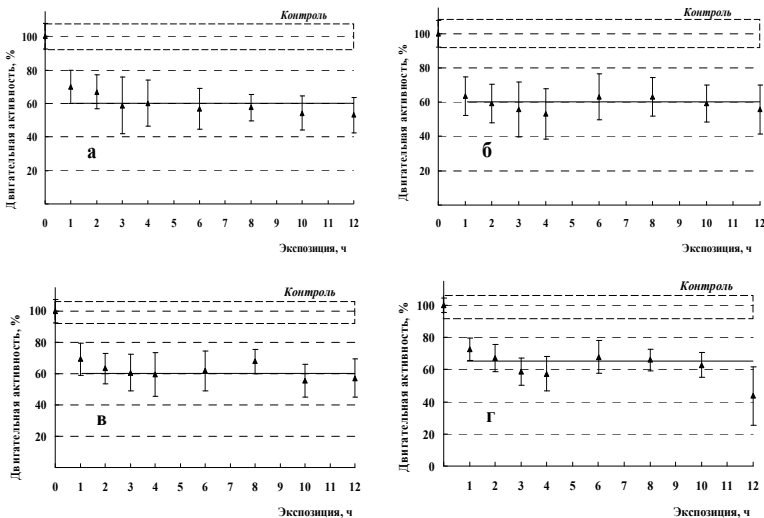


Рис. 10. Изменение двигательной активности спиростом на 4-е (а), 14-е (б), 21-е (в) и 30-е (г) сутки после электромагнитного облучения на частоте 10 ГГц с ППЭ 10 мкВт/см²

Видно, что обнаруженный эффект снижения двигательной активности у спиростом при нахождении в ЭМП с указанными параметрами сохраняется и в отдаленные сроки после воздействия, даже через 30 суток, на протяжении которых у спиростом сменяется 10–15 поколений. Известно, что продолжительность клеточного цикла инфузорий составляет 2-3 суток. Таким образом можно заключить, что эффект наследуется при вегетативном размножении простейших.

Обнаруженный феномен является необычным для действия электромагнитного излучения. Однако, наследование эффектов облучения γ -квантами у биологических объектов разного уровня филогенеза, включая простейших, наблюдали разные авторы. Так, И.Б. Бычковской с соавт. (2006) описаны необычные эффекты γ -облучения в малых дозах по критерию изменения жизнеспособности популяций инфузорий *Paramecium caudatum* и *Climacostomum virens*, амёб и клеток млекопитающих. Авторы выявили дозозависимое снижение выживаемости перечисленных тест-объектов. Указанные нарушения сохранялись в отдаленные сроки после облучения – наследовались. Данные, полученные Р.Барбером и Ю.Дубровой (Barber, Dubrova, 2000, 2006) показали нестабильность генома у не подвергшихся воздействию потомков облученных в дозе 0.5 Гр мышей-родителей, продемонстрировали половую нестабильность необлученных потомков и видонеспецифичность эффекта в опытах с разными линиями мышей. О’Дауд, К.Мазерсил с соавт. (O’Dowd, Mothersill et al, 2006, 2009) показали снижение выживаемости клеток жабр при прямом действии ионизирующего излучения в дозах 0,5 и 5 Гр на ткани эксплантатов радужной форели.

Все вышеперечисленное убеждает в реальности полученного нами эффекта действия низкоинтенсивных ЭМИ и наводит на мысль о едином механизме биологического действия разных факторов в малых дозах.

Экспериментальное обоснование возможного механизма биологического действия ЭМИ. Слабые ЭМП не могут вызывать тепловые эффекты и вносить существенные изменения в константы скорости биохимических реакций. Возможно, эти поля действуют опосредованно, изменяя концентрацию или активность кинетически значимых (триггерных) молекул или их комплексов. Известно, что незначительное изменение концентрации активных форм кислорода

(АФК) может существенно повлиять на химические реакции в биологических системах. АФК приводят к окислительным повреждениям нуклеиновых кислот, белков и липидов. В некоторых работах показано, что слабые ЭМП могут увеличивать концентрацию перекиси водорода, одной из причин образования которой является повышение кислотности среды. В качестве другого возможного механизма биологического действия ЭМИ в литературе предлагают опосредованное действие облученной воды на организм.

Нами проведен анализ изменений рН водной среды в ЭМП с частотой 1 ГГц и ППЭ 50 мкВт/см² в течение 10 мин, 1, 3 и 6 ч. Напомним, что выбранные экспозиции приводили к значимому снижению двигательной активности облученных спиростом. Результаты измерения кислотности водной среды приведены в табл.3.

Таблица 3

Изменение концентрации водородных ионов после экспозиции в электромагнитном поле на частоте 1 ГГц, ППЭ 50 мкВт/см²

№ опыта	Экспозиция в ЭМП				
	Контроль	10 мин	1 ч	3 ч	6 ч
1	8,0 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,2 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,3 ± 0,2
2	8,1 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,3 ± 0,2
3	8,2 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,4 ± 0,2	8,2 ± 0,2
Среднее	8,1 ± 0,2	8,1 ± 0,2	8,2 ± 0,2	8,3 ± 0,2	8,3 ± 0,2

* $p \leq 0,05$

Видно, что достоверного изменения рН водной среды при низкоинтенсивном радиочастотном воздействии с указанными параметрами не происходит.

Нами проведен эксперимент по оценке опосредованного влияния облученной на частоте 1 ГГц с ППЭ 50 мкВт/см² воды на изменение двигательной активности необлученных инфузорий. Напомним, что нахождение спиростом в течение 1 ч в ЭМП с исследуемыми параметрами приводит к значимому снижению их двигательной активности. Однако результаты экспериментов продемонстрировали, что облученная вода не изменяет двигательную активность необлученных спиростом. Вероятно, изменение структуры «внешней» воды, которое, возможно, и происходит под действием слабых ЭМП, не является достаточным фактором для нарушения функционального состояния простейших.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в работе экспериментальные данные показали чувствительность инфузорий к низкоинтенсивным ЭМИ по критерию снижения их двигательной активности. Представленный в работе экспресс-метод позволяет максимально быстро оценить влияние электромагнитного фактора на изменение поведенческой активности простейшего организма.

Показано, что непрерывно генерируемое низкоинтенсивное электромагнитное излучение на частоте мобильной связи (1 ГГц) и частоте радиовещания и спутникового телевидения (10 ГГц) вызывает у протестированного гидробионта выраженные нарушения двигательной активности. При этом эффект характеризуется наличием порога, зависящего от продолжительности нахождения в ЭМП и плотности потока электромагнитной энергии. Напомним, что нами были изучены ППЭ ЭМП, наиболее часто используемые населением в обыденной жизни. В условиях эксперимента воздействие ЭМП на инфузорий как на частоте 1 ГГц, так и 10 ГГц с ППЭ 10 мкВт/см^2 , которая является предельно допустимой по существующим гигиеническим нормативам, наблюдали пороговое снижение двигательной активности инфузорий через 45 минут нахождения в ЭМП. При электромагнитном воздействии с ППЭ 5 мкВт/см^2 , которая ниже ПДУ в два раза, период допустимого (безопасного) нахождения инфузорий составлял около 8 ч и был практически одинаковым для частот ЭМП, отличающихся в 10 раз. При ППЭ 50 мкВт/см^2 допустимый (безопасный) период непрерывного нахождения в радиочастотном электромагнитном поле составлял не более 10 мин как на частоте 1 ГГц, так и 10 ГГц. Уровень ЭМП с ППЭ 50 мкВт/см^2 наблюдается на больших территориях вокруг базовых станций сотовой связи стандарта GSM, которые в настоящее время часто размещаются в селитебной зоне.

Обнаруженный нами эффект снижения двигательной активности у спиростом при нахождении в ЭМП с ППЭ 10 мкВт/см^2 и частотой 10 ГГц сохраняется и в отдаленные сроки, даже через 30 суток, на протяжении которых у спиростом сменяется до 10–15 поколений. Учитывая однотипность проявления эффекта как при облучении на частоте 1 ГГц, так и 10 ГГц допустимо предположить, что полученный эффект наследования будет характерен и для частоты мобильной связи.

Молекулярно-генетические механизмы выявленного эффекта пока неясны. В литературе активно обсуждают роль эпигенетических изменений низкоинтенсивных воздействий. Основными аргументами тому является, во-первых, высокая частота встречаемости нестабильных клеток/организмов среди потомства и, во-вторых, устойчивое проявление этого феномена на протяжении длительного промежутка времени. Немецкие ученые Г.Гримес и К.Ауфдерхейд (Grimes, Aufderheide, 1991) у таких инфузорий, как *Tetrahymena* и *Paramecium* обнаружили генетически идентичные клетки с различиями в паттернах ресничных рядов, расположенных на клеточной поверхности. При этом измененные структуры действовали как матрицы для новых структур. В обзорах Е.Яблонки и М.Лэмба (Jablonka, Lamb, 1989, 2003, 2008) показано, что связывающиеся с ДНК белки или дополнительные химические группы могут влиять на ее активность и изменять экспрессию генов. Одним из типов маркировки ДНК является паттерн метилирования генов. При этом низкий уровень метилирования связан с потенциальной активностью, а высокий – с ее отсутствием. Изменения в паттернах метилирования могут быть индуцированы факторами окружающей среды. Эти измененные паттерны могут устойчиво наследоваться в ряду многих клеточных делений.

Однако, учитывая комплексный характер нарушений, трудно представить, что эпигенетический механизм обладает столь множественным эффектом. Множественный характер выявленных нарушений у облученных особей и их потомков может быть связан с наличием целого комплекса повреждений, затрагивающих, в том числе геном потомков облученных родителей.

Прикладное значение работы связано с регламентирование опасности низкоинтенсивных радиочастотных воздействий на биоту. При этом особое значение имеют инновационные данные об отрицательном эффекте действия ЭМП при уровне ППЭ в 2 раза более низком, чем предельно-допустимый в России, о существовании безопасных периодов такого воздействия и данные о зависимости продолжительности безопасного времени воздействия от ППЭ.

ВЫВОДЫ

1. Электромагнитное излучение в пределах частот и мощностей, используемых в практике радиосвязи, способно оказывать биологическое действие, что в частности и проявляется в изменении двигательной активности инфузорий *Spirostomum ambiguum* при его воздействии.

2. Снижение двигательной активности инфузорий в условиях низкоинтенсивного электромагнитного воздействия как на частоте 1 ГГц, так и 10 ГГц с плотностью потока энергии от 5 до 50 мкВт/см² имеет пороговый характер и не зависит от частоты излучения. При этом время наступления порога сокращается по мере увеличения плотности потока энергии ЭМП.

3. Допустимое (безопасное) время нахождения инфузорий в электромагнитном поле в зависимости от плотности потока энергии при частотах 1 и 10 ГГц составило при ППЭ 5 мкВт/см² – около 8 ч, при ППЭ 10 мкВт/см² – около 45 мин, при ППЭ 50 мкВт/см² – не более 10 мин.

4. Обнаруженное снижение двигательной активности у инфузорий, подвергнувшихся низкоинтенсивному электромагнитному воздействию, сохраняется в срок не менее 30-ти суток, на протяжении которых сменилось более 10-15 поколений спиростом.

5. Полученные результаты свидетельствуют в пользу введения в нашей стране системы регламентирования электромагнитного загрязнения биосферы.

СПИСОК СОБСТВЕННЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК

1. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Козьмин Г.В., Игнатенко Г.К. Влияние на *Escherichia coli* электромагнитного излучения нетепловой мощности в частотном диапазоне от 8820 до 10400 МГц // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. №1-2. С. 88-92.

2. Егорова Е.И., Тушмалова Н.А., **Иголкина Ю.В.** Влияние СВЧ-излучения нетепловой мощности на спонтанную двигательную активность донервных эукариот (на примере *Spirostomum ambiguum*) // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. №5-6. С. 58-61.

3. Бычковская И.Б. Егорова Е.И, **Иголкина Ю.В.**, Федорцева Р.Ф. Нестохастические эффекты как показатели радиационной опас-

ности для биоты в поставарийных ситуациях // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2007. №2. С. 32-37.

4. Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.** Наследование снижения спонтанной двигательной активности у одноклеточных гидробионтов *Spirostomum ambiguum* после γ -облучения в малых дозах // Радиация и риск. Бюллетень Радиационно-эпидемиол. регистра РАМН. 2008. Т.17, №3. С. 54-58.

5. Sarapultseva E.I., **Igolkina J.V.**, Litovchenko A.V. Evaluation of the maximum permissible level of low-intensity electromagnetic radiation at mobile connection frequency (1GHz) by changes in motor activity of *Spiristimum ambiguum* // Bulletin of experimental biology and medicine. 2009. 147, No4. PP. 431-433.

6. **Иголкина Ю.В.**, Сарапульцева Е.И., Литовченко А.В. Изменение спонтанной двигательной активности инфузорий *Spirostomum ambiguum* после низкоинтенсивного электромагнитного облучения как информативный метод биотестирования // Биомедицинская радиоэлектроника. 2009. № 9. С. 49-52.

7. Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.** Наследуемое снижение спонтанной двигательной активности *Spirostomum ambiguum* после низкоинтенсивного электромагнитного воздействия на частоте 10 ГГц // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. №1. С. 45-48.

8. Бычковская И.Б., Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.**, Федорцева Р.Ф., Алексанин С.С. Нестохастические эффекты как новый тест радиационной опасности для биоты. Сообщение 2. Наследственные формы повреждения // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. 2010. №3. С. 65-69.

9. Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.** Нарушение функции движения у одноклеточных гидробионтов при слабых радиочастотных воздействиях. Опыты на инфузориях *Spirostomum ambiguum*, облученных на частоте мобильной связи (1 ГГц) при разных значениях плотности потока энергии // Биомедицинская радиоэлектроника. 2010. №10. С. 49-54.

Статьи в рецензируемых журналах

10. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Козьмин Г.В., Игнатенко Г.К. Влияние на *E.coli* и *Spirostomum ambiguum* электромагнитного излучения нетепловой мощности в частотном диапазоне от 8820 до 10400 МГц // Вестник Саровского физтеха. 2003. №5. С. 48-55.

Материалы и тезисы международных и всероссийских конференций

11. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Игнатенко Г.К. Влияние низкоинтенсивного СВЧ-излучения на биообъекты / Тезисы докл. III Международного конгресса «Энергетика – 3000». Обнинск: ИАТЭ, 2002. С. 114-115.

12. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Верушкина Г.Н., Мелехова О.П. Экология водоема в районе размещения предприятия атомной промышленности / Успехи современного естествознания. Матер. междунар. конфер. «Мониторинг окружающей среды». 2003. №12. С. 90-91.

13. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Игнатенко Г.К. Сравнение эффектов биологического действия ионизирующего и неионизирующего излучений на микроорганизмы / Тез. докладов междунар. студенч. научной конференции «Полярное сияние-2003». СПб., 2003. С. 81-82.

14. **Иголкина Ю.В.**, Латынова Н.Е., Сайтгареева И.В., Каюмова Н.И., Грищенкова Е.А., Бахвалова Е.В. Гидрохимическая характеристика ОС в районе предприятия атомной энергетики / Тез. докладов междунар. студенч. научной конференции «Полярное сияние-2003». СПб., 2003. С. 86-87.

15. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Козьмин Г.В. Биологическое действие низкоинтенсивного СВЧ-излучения на микроорганизмы / Сб. научных трудов II научно-технической конференции «Научная сессия МИФИ-2003. Научно-инновационное сотрудничество». М.: МИФИ, 2003. Ч.2. С. 30-31.

16. **Иголкина Ю.В.**, Верушкина Г.Н., Шурцова О.В. и др. Биотестирование качества воды р. Протвы в районе расположения предприятия Минатома России / Тез. докладов III научно-технич. конференции «Научная сессия МИФИ-2004. Научно-инновац. сотрудничество». М.: МИФИ, 2004. Ч.1. С. 218-219.

17. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Козьмин Г.В. К проблеме экологического нормирования факторов электромагнитной природы в условиях общего техногенного загрязнения окружающей среды. / Приложение к журналу «Экология человека», материалы Всероссийской конференции «Биологические аспекты экологии человека». 2004. Т.1. № 4. Архангельск, 2004. С. 214-217.

18. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И., Козьмин Г.В. К вопросу нормирования электромагнитных излучений / Успехи современного естествознания. Материалы электронной конференции «Электромагнитные факторы окружающей среды». 2004. №10. С. 93-94.

19. **Иголкина Ю.В.**, Егорова Е.И. К проблеме биологического действия нерадиационных факторов на биоту в условиях техногенного загрязнения окружающей среды / Тез. докладов II Международной конференции «Биотехнология – охране окружающей среды». М.: МГУ, 2004. С. 112.

20. **Igolkina J.**, Yegorova E., Kozmin G. Ecological standardization of factors in environmental pollution. / Abstract of the Inter. congress ECORAD, 2004. P.2.

21. **Igolkina J.**, Yegorova E. Ecological standardization of biosphere / Abstract of the 1st Intern. conference of Timofeeff-Resovsky. Yerevan, Dubna, 2005. P.111.

22. **Иголкина Ю.В.**, Сарапульцева Е.И. Наследуемые стабильные изменения выживаемости и спонтанной двигательной активности простейших гидробионтов *Spirostomum ambiguum* после воздействия ЭМИ радиочастот / Материалы IV Междунар. конфер. «Электромагнитные излучения в биологии: БИО-ЭМИ-2008». Калуга: КГПУ, 2008. С. 155-157.

23. **Иголкина Ю.В.** Поведенческая реакция инфузорий *Spirostomum ambiguum* на действие низкоинтенсивного СВЧ излучения / Материалы III Всерос. конферен. «Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы». Борок, 2008. С. 44-47.

24. **Иголкина Ю.В.**, Сарапульцева Е.И., Малина Ю.Ю. Линейно-пороговые эффекты γ -облучения в диапазоне малых доз / Сб.тез. докл. VIII Междун. научной конферен. «Сахаровские чтения-2008». «Экологические проблемы XXI века». Минск: Минск: ун-т им. А.Д.Сахарова, 2008. С. 209.

25. Sarapultseva E.I., **Igolkina J.V.** Behavioral reaction of protozoa as AN indicator of electromagnetic environmental contamination /

Тез. докл. XVII Междунар. конфер. «Биоиндикаторы в окружающей среде»/ М.: МГУ, 2009. С.57.

26. Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.** Влияние низкоинтенсивного электромагнитного излучения с разной плотностью потока энергии на поведенческую активность гидробионтов / Сб. матер. V Междунар. конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии медицины». С.Пб, 2009. С. 9.

27. **Иголкина Ю.В.** Изменение спонтанной двигательной активности инфузорий как информативный метод биотестирования электромагнитного загрязнения окружающей среды / Сб. материалов Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи «Экотоксикология-2009». Пущино: ИБФМ РАН, 2009. С. 36-38.

28. Сарапульцева Е.И., **Иголкина Ю.В.** Поведенческая реакция простейших гидробионтов как показатель электромагнитного загрязнения окружающей среды / Приложение к журналу «Бюллетень московского общества испытателей природы»: научно-практической конференции «Экология, природные ресурсы и развитие Московского региона». М.:МГУ, 2009. Т.114, вып.3. С. 360.

29. **Иголкина Ю.В.** Оценка опасности низкоинтенсивного электромагнитного излучения радиочастотного диапазона на модели простейших гидробионтов / Тез. докл. XIV Международной Пущинской школы-конференции молодых ученых «Биология – наука XXI века». Пущино, 2010. С. 40.

30. Sarapultseva E.I., **Igolkina J.V.** Changes in motional activity of unicellular aquatic organisms after low-intensity electromagnetic radiation / Abstract of the 3^d European IRPA-2010, Helsinki, 2010. P.230.

31. Sarapultseva E.I., **Igolkina J.V.** Biological hazard of low-intensity radio frequency electromagnetic fields. Model experiments with protozoa / Preceding of the 3^d European IRPA 2010, Helsinki, Finland on 14-18 June 2010. CD. PP. 1-10.

32. **Иголкина Ю.В.** Изменение функциональной активности инфузорий в ответ на электромагнитное загрязнение окружающей среды / Тез. докл. XIV Международной школы-конференции молодых ученых «Биология внутренних вод». Борок: ин-т биологии внутренних вод. 2010. С. 18.

Компьютерная верстка Ю.В. Иголкина

ЛР № 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати

Формат бумаги 60×84/16

Печать ризограф.

Бумага МВ

Печ.л. 1,75

Заказ №

Тираж 80 экз.

Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ
249035, г. Обнинск, Студгородок, 1