

На правах рукописи



УСКАЛОВА Дарья Вадимовна

**ВЛИЯНИЕ НИЗКОИНТЕНСИВНОГО РАДИОЧАСТОТНОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ НА МОРФО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ У
ПРОСТЕЙШИХ И БЕСПОЗВОНОЧНЫХ ЖИВОТНЫХ**

Специальность 03.01.01 – Радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Обнинск – 2018

Работа выполнена в Обнинском институте атомной энергетики – филиале Федерального государственного автономного образовательного учреждения «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель

**Сарапульцева
Елена Игоревна**

Доктор биологических наук, доцент

Официальные оппоненты:

**Жаворонков
Леонид Петрович**

Доктор биологических наук, Медицинский радиологический научный центр им. А.Ф. Цыба – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения «Научный медицинский исследовательский центр радиологии» Министерства здравоохранения РФ, зам. заведующего центром инновационных радиологических и регенеративных технологий

**Тирас
Харлампий
Пантелеевич**

Кандидат биологических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук, ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова», биологический ф-т

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 г. в ____ на заседании диссертационного совета Д 006.068.01 при Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии» по адресу: 249032, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш., 109 км, ФГБНУ ВНИИРАЭ, зд. 1, к. 510.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке и на сайте ФГБНУ ВНИИРАЭ <http://www.rirae.ru> (<http://www/ds/rirae.ru/>)

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Шубина Ольга Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время большое внимание уделяется оценкам риска и биологическим эффектам электромагнитного излучения (ЭМИ) у биоты (Гапочка, 2013; Григорьев, 2014; Песня и др., 2011; Сарапульцева, 2016; Филенко, Чуйко, 2017; Krylov et al, 2016; Merhi, Zaher, 2012). При этом кардинально различается точка зрения как на механизмы действия радиочастотного излучения, так и на сам феномен биологического действия низкоинтенсивных ЭМИ. Отсюда громадные различия в санитарно-гигиенических уровнях воздействия, рекомендованных в разных странах, и отсутствие экологических основ нормирования.

Уже сейчас некоторые водные экосистемы подвержены действию антропогенных электромагнитных полей (Krylov et al, 2016), которые могут возникать в воде под высоковольтными линиями электропередач, при работе мощных радиостанций, радиолокаторов и других источников или преобразователей электрической энергии (Чеботарева и др., 2009). По мнению специалистов, при широком развитии современных радиолокационных технологий, электромагнитное воздействие на компоненты водной среды будет только расти (Григорьев, 2014).

Пресноводные экосистемы представлены биотой разных трофических уровней, различающейся по чувствительности к ЭМИ (Гапочка, 2013; Крылов, 2007). Простейшие (инфузории) и беспозвоночные (планарии и ракообразные) животные, являются консументами, представителями зоопланктона и макрозообентоса, служат кормом мальков и/или крупных промысловых рыб и обеспечивают самоочищающую способность водоемов (Крылов, 2005). Выпадение этого важного звена из трофической цепи может привести к нарушению гомеостаза водоема. Морфофизиологический подход в оценке действия факторов, вызывающих стресс, является важной составляющей биологического мониторинга. Он отражает жизнеспособность тестируемых особей и сохранение гомеостаза среды их обитания. Комплексная, включающая разные методические подходы и показатели жизнеспособности организмов разных систематических групп, оценка эффектов действия низкоинтенсивного ЭМИ диапазона сотовой связи является важной теоретической и практической задачей радиобиологии неионизирующих излучений.

Степень разработанности проблемы. Электромагнитный фон Земли увеличился за последние десятилетия в тысячи раз (Григорьев, 2015). По результатам измерения интенсивностей ЭМИ вблизи 1347 базовые станции (БС) диапазон изменения плотности потока энергии (ППЭ) составляет от 0,17 до 471 мкВт/см² (Григорьев и др., 2010; Жаворонков, Петин, 2016).

Мишенью для формирования индуцированных ЭМИ биологических эффектов являются, в первую очередь, мембраны, морфологические и функциональные нарушения которых обнаруживаются сразу после облучения при очень малых уровнях воздействия. Изменения размеров мембранных пор нарушает ионный транспорт и пролиферативные процессы в клетке (Mangel et al, 2016), происходит активация перекисного окисления ненасыщенных жирных кислот и нарушение процессов окисления и фосфорилирования в митохондриях (Geoffry et al, 2009). Активные формы кислорода (АФК), возникавшие под действием ЭМИ, замедляют клеточный цикл, приводят к апоптозу клеток яичников и негативно влияют на репродуктивную функцию дрозофил (Mangel et al, 2016). На крысах Вистар показано, что воздействие ЭМИ с частотой 900 МГц вызывает снижение активности антиоксидантных ферментов пероксидазы и супероксиддисмутазы (Merhi, Zaher, 2012). В сперматозоидах человека под воздействием излучения сотовой связи обнаружено увеличение биомаркеров повреждения ядерной и митохондриальной ДНК (De Iuliis et al, 2009). Показано, что низкоинтенсивное ЭМИ вызывает снижение активности дегидрогеназ и других оксидаз (Григорьев, 2004). Цитогенетические исследования выявили инициацию хромосомных нарушений в соматических и половых клетках *Allium cepa* и *Drosophila melanogaster* (Песня и др., 2011), у крыс выявлены нарушения в системе крови и 2-кратное увеличение смертности (Adang et al, 2010). В исследованиях на планариях *Dugesia tigrina* обнаружено, что ЭМИ (36 ГГц, ППЭ 100 мкВт/см²) стимулирует регенерацию (Демцун и др., 2008; Ярмолюк, 2012). В другой работе показано, что ЭМИ с частотой 900 МГц снижает скорость регенерации планарий в 3 раза (Пичугин и др., 2002). В работах (Воробьева, 2013; Воробьева и др., 2006) показано, что низкоинтенсивные ЭМИ разных частотных диапазонов вызывают трансгенерационные аномалии развития и раннюю гибель молоди в родительском и трех последующих поколениях *D. magna*. Морфо-функциональные показатели *D. magna* изменялись также под влиянием диодного облучения (Филенко и др., 2015). Низкоинтенсивное (100 мкВт/см²) ЭМИ (42 ГГц) ингибировало двигательную активность инфузорий *Paramecium caudatum* (Гапеев, 2014). По мнению автора, действие излучения обусловлено изменением баланса (Ca²⁺) за счет потоков ионов из цитоплазмы клеток в ресничную аксонему инфузории. Таким образом, закономерности формирования биологических эффектов при низкоинтенсивных воздействиях на биоту до сих пор остаются дискуссионным вопросом из-за регистрации разнонаправленных изменений.

Цель работы – выявить закономерности формирования острых и отдаленных эффектов действия низкоинтенсивного радиочастотного излучения с частотой 900 МГц и ППЭ 50 и 100 мкВт/см² по морфофункциональным показателям у простейших и беспозвоночных животных в модельных экспериментах.

Для достижения цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать метод прижизненной компьютерной морфометрии применительно к простейшим и оценить динамику изменения морфометрических показателей у инфузорий *S. ambiguum* после низкоинтенсивного ЭМИ. Сравнить с индуцированным ЭМИ изменением процесса регенерации у плоских червей планарий *D. tigrina* и *S. mediterranea*.

2. Методом проточной цитометрии проанализировать динамику пролиферативной активности у планарии *D. tigrina* и *S. mediterranea* после низкоинтенсивного радиочастотного воздействия и сопоставить с эффектом регенерации.

3. Оценить продолжительность жизни ракообразных *D. magna* после радиочастотного воздействия в разные периоды онтогенеза.

4. Проанализировать изменение метаболической активности у ракообразных *D. magna* и планарий *D. tigrina* и *S. mediterranea* и сопоставить изменения на биохимическом уровне с функциональными эффектами выживаемости и регенерационной активности.

5. Оценить изменение электрофизических и химических характеристик культуральной воды в условиях низкоинтенсивного радиочастотного излучения при культивировании в ней гидробионтов.

6. Выявить общие закономерности формирования эффектов низкоинтенсивного радиочастотного облучения у простейших и беспозвоночных гидробионтов.

Научная новизна. Впервые разработан и применен метод компьютерной морфометрии применительно к простейшим для выявления эффектов радиационного воздействия электромагнитных полей (ЭМП) с частотой 900 МГц в модельных экспериментах. Впервые выявлены и проанализированы закономерности формирования эффектов облучения ЭМП с частотой 900 МГц и ППЭ 50 и 100 мкВт/см² у простейших (инфузорий) и многоклеточных беспозвоночных животных (планарий и ракообразных) в непосредственно облученном поколении. Впервые обнаружено, что эффект нивелируется при вегетативном делении простейших через 3–5 поколений. Впервые применен цитометрический анализ пролиферативной активности для выявления эффекта радиочастотного воздействия у планарий. Впервые, с применением МТТ-теста удалось зафиксировать снижение метаболической активности у

ракообразных *D. magna* у планарий *D. tigrina* в ранние сроки после облучения. Показано, что нарушение метаболической активности не влияет на выживаемость рачков и регенерационную активность планарий в отдаленные сроки после воздействия.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты вносят вклад в изучение фундаментальных закономерностей биологического действия низкоинтенсивного радиочастотного излучения на биоту. Выявленные на простейших и беспозвоночных животных закономерности индуцированных радиочастотным полем изменений могут стать важным информационным компонентом при составлении баз данных экологического мониторинга пресноводных экосистем. Использование современных методов инструментального анализа и важных звеньев трофических цепей пресноводной экосистемы в качестве тест-объектов позволит проводить комплексное экологическое исследование гидросферы при остром радиационном воздействии. Разработанный метод компьютерной морфометрии на простейших может быть использован для экспресс-диагностики низкоинтенсивного радиочастотного воздействия на гидробионтов. Результаты могут быть использованы для создания баз данных и разработки системы экологического нормирования электромагнитной нагрузки в районах размещения базовых станций сотовой связи.

Методология и методы диссертационного исследования. Работа проведена на тест-объектах разного уровня биологической организации: одноклеточных инфузориях *Spirostomum ambiguum*, многоклеточных плоских червях планариях *Dugesia tigrina* и *Schmidtea mediterranea* и низших ракообразных *Daphnia magna*. Применены современные методы анализа биологических эффектов: компьютерной морфометрии, проточной цитометрии, МТТ-тест. Для анализа физико-химических характеристик воды применены СВЧ-система в составе векторного анализатора цепей и набор для измерения диэлектрических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

1. Использование тест-объектов разной систематической принадлежности позволяет оперативно выявлять изменения жизнеспособности, вызываемые радиочастотными излучениями на разных уровнях биологической организации.

2. Низкоинтенсивное радиочастотное излучение, превышающее санитарно-гигиенические нормативы в 5 и 10 раз, вызывает у гидробионтов – простейших и беспозвоночных животных, кратковременные морфо-функциональные изменения, которые нивелируются в отдаленные сроки в облученном поколении у

долгоживущих видов и через два – три поколения у короткоживущих видов.

3. Низкоинтенсивное радиочастотное излучение не изменяет электрофизические и химические характеристики среды обитания гидробионтов.

Достоверность результатов. Достоверность результатов определяется применением современных методов анализа биологических эффектов у простейших и беспозвоночных животных и авторских разработок с использованием больших объемов экспериментальных данных. Статистическую обработку полученных результатов проводили с помощью тестов Крускаллы–Уоллеса, Манна–Уитни и χ^2 с поправкой Бонферрони на множественное сравнение в программе Statistica 12.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 03.01.01 «Радиобиология», являющейся комплексной научной дисциплиной, изучающей действие ионизирующих и неионизирующих излучений на системы и биологические объекты разных уровней организации и охватывающей проблемы радиочувствительности биологических объектов (п. 5), в диссертационном исследовании представлены результаты анализа действия низкоинтенсивного электромагнитного излучения на морфо-функциональные показатели представителей разных систематических групп животных – инфузорий, планарий и ракообразных, и исследованы механизмы формирования острых и отдаленных эффектов облучения.

Апробация работы. Результаты исследования доложены на региональных («Техногенные системы и экологический риск», Обнинск 2012, 2015–2018) и международных конференциях («Компьютерная биология – от фундаментальной науки к биотехнологии и биомедицине», Пушино 2011, «Биология – наука XXI века», Пушино, 2012, 2016; «Безопасность АЭС и подготовка кадров», Москва, 2013; Научная сессия МИФИ, Москва, 2012, 2014, 2015, «Биодиагностика в экологической оценке почв и сопредельных сред», Москва, 2013; VII съезд по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность), Москва, 2014; «Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии», Москва, 2016; «Ломоносов-2016 и 2017», Москва; «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине», Санкт-Петербург, 2012, 2015; «Сахаровские чтения», Минск, Республика Беларусь 2012; IRPA, Глазго, Шотландия, 2012; ERR, Дублин, Ирландия, 2013; «II International conference on radio ecological concentration processes (50 years later)», Севилья, Испания, 2016, ежегодной международной конференции английского радиационного общества ARR

IRRS 2018, Белфаст, Великобритания. Материалы диссертации представлены на региональном конкурсе инновационных проектов УМНИК-2016. За творческую активность в проведении фундаментальных и прикладных научных исследований автором диссертации получен «Почетный знак им. Дашковой», Калуга, 2016.

Личный вклад автора. Автор лично участвовал в формулировке проблемы, постановке цели и задач, планировании и проведении экспериментов, разработке метода морфометрии на простейших, пробоподготовке образцов и анализе пролиферативной активности планарий, проведении МТТ-теста на планариях и ракообразных и анализе результатов, пробоподготовке и электрофизическом анализе проб воды, подготовке материала для обсуждения на конференциях и публикации статей в научных журналах.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 22 печатные работы. Из них 6 статей в изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 публикации в изданиях, включенных в Web of Science.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, выводов, списка используемых источников. Работа изложена на 137 стр., содержит 19 рисунков, 10 таблиц и 2 приложения. Список литературы включает в себя 214 источников, из них 67 на иностранном языке.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи, научная новизна и практическая значимость исследования.

Глава 1. Обзор литературы. В главе приведен анализ отечественных и зарубежных источников литературы, в которых обсуждаются возможные механизмы формирования эффектов действия низкоинтенсивных электромагнитных полей на гидробионтов из разных систематических групп – представителей типов Инфузории, Плоские черви и Членистоногих (класс Ракообразные).

Глава 2. Материалы и методы исследования. В работе использована установка, в которой применен маломощный генератор высокочастотного сигнала Г4-76А и пирамидальная рупорная антенна, имеющая узкую диаграмму направленности (Литовченко и др., 2011).

Работа проведена на тест-объектах разного уровня эволюционной организации: одноклеточных инфузориях *S. ambiguum*, планариях *D. tigrina* и *S. mediterranea* и ракообразных *D. magna*. Тест-объекты содержались в климатостате при 20 ± 1 °С с режимом освещения 12/12 ч свет/тьма в отстоянной дважды фильтрованной водопроводной воде

согласно методикам культивирования (Тушмалова, 1986; OECD, 2012; Терехова и др., 2014; Тирас, Асланиди, 2013).

Инфузорий *S. ambiguum* облучали в массовой культуре в 4 мл воды в ЭМП с частотой 900 МГц, ППЭ 50 мкВт/см² и экспозициями 30 и 60 мин, что соответствует дозам 0,09 и 0,18 Дж/см². Всего протестировано 450 простейших в контрольных выборках и 750 – в опытных.

Планарий *S. mediterranea* и *D. tigrina* декапитировали и облучали в 4 мл воды в ЭМП с частотой 900 МГц, ППЭ 100 мкВт/см² и экспозициями 60 и 180 мин, что соответствует дозам 0,36 и 1,08 Дж/см². Все эффекты получены на 284 планариях в контрольных выборках и 369 – в опытных. Одновременно, в качестве положительного контроля, проводили эксперименты по анализу эффекта γ -облучения планарий. Известно, что γ -облучение изменяет морфо-функциональные характеристики биоты (Сарапульцева, 2017). Облучение проводили на терапевтической установке Луч-1 (Латвэнерго, Латвия, ⁶⁰Co) в дозах от 0.1 до 10 Гр (мощность дозы 94 сГр/мин). Всего анализ регенерационной активности выполнен на 93 планариях в опыте и 79 – в контроле, анализ пролиферации – 110 планарий в опыте и 180 планарий в контроле.

Односуточных новорожденных *D. magna* по 10 особей облучали с частотой 900 МГц, ППЭ 100 мкВт/см² и экспозицией по пять суток, что соответствует дозе 43,2 Дж/см², в ювенильный (1-5 сутки после рождения) и пубертатный (6-10 сут). После облучения *D. magna* пересаживали по одной особи в стаканы с 50 мл воды и культивировали до 21-суточного возраста. Все контрольные группы находились в аналогичных условиях, но без облучения. Эффекты выживаемости и МТТ-показатель исследованы на 3420 ракообразных в контроле и на 6940 особях – в опыте.

Для анализа морфометрических изменений у *D. tigrina* и *S. mediterranea* применен метод компьютерной морфометрии по индексу регенерации. Кинетику роста бластемы в экспериментальных и контрольных группах животных определяли методом регистрации фотоконтраста между старыми (пигментированными) и новыми (прозрачными) частями тела планарий после декапитации животных. Морфометрические изменения были изучены в авторской модификации метода в программе «Морфометр «Image-Pro». Для фиксирования изображений использовали систему видеонаблюдения, состоящую из цифровой камеры, вмонтированной на окуляр микроскопа МБС-10 с выходом на монитор компьютера Pentium 1.5G в программе ScopePhoto. Обработку видеоизображения осуществляли с помощью программного обеспечения «Морфометр «Image-Pro».

Для оценки пролиферативной активности у *S. mediterranea* применен метод проточной цитометрии (Ermakov et al, 2012). Анализ

образцов проводила на проточном цитофлуориметре FACS Calibur (BDIS, США).

Выживаемость *D. magna* после экспозиции в ЭМП оценивали на ежедневной основе в 21 суточном эксперименте стандартным методом (OECD, 2012).

Для оценки метаболической активности клеток в образцах планарий *D. tigrina* и ракообразных *D. magna* применен МТТ-тест (Cancer Cell Culture, 2011). Измерения МТТ-показателя в единицах оптической плотности (ОП) проводили на планшетном иммуноферментном анализаторе StatFax 2100 (США, VIS-модель).

Для анализа комплексной диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельной электрической проводимости воды, в которой культивировали *D. magna*, применена СВЧ-система в составе векторного анализатора цепей R&S ZVH8 (RONDE & SCHWARZ GmbH&Co, Германия) и набора для измерения диэлектрических свойств материалов DAK-12 (SPEAG AG, Швейцария) в частотном диапазоне 900 – 2900 МГц. В лицензированной испытательной лаборатории «АСЭКО» (Обнинск) проанализирована динамика изменения рН, O₂, общей минерализации и других химических характеристик культуральной воды по (РД 52.24.495-2005; РД 34.51.302). В опыте использовано 200 ракообразных.

Глава 3 Результаты и их обсуждение

Модификация метода компьютерной морфометрии проведена на основе методики, разработанный для анализа регенерации у планарий (Тирас, 1980). Количественными критериями нарушения формы тела были выбраны четыре наиболее информативных показателя, заложенных в программу Image-Pro: отношение минимального и максимального диаметров (Aspect), длина тела инфузории, периметр и отклонение от окружности (Roundness). На рис. 1 приведено количество инфузорий с разными значениями показателя «Отклонение формы тела от окружности». Видно, что без облучения форма тела большинства исследуемых особей отклоняется от окружности в среднем на 4,5 усл.ед, а в опыте – на три. Расчет «физиологической нормы» был произведен по формуле: $X_{cp} \pm 2 Std$, где X_{cp} – среднее значение в контроле по каждому признаку, $2 Std$ – два стандартных отклонения.

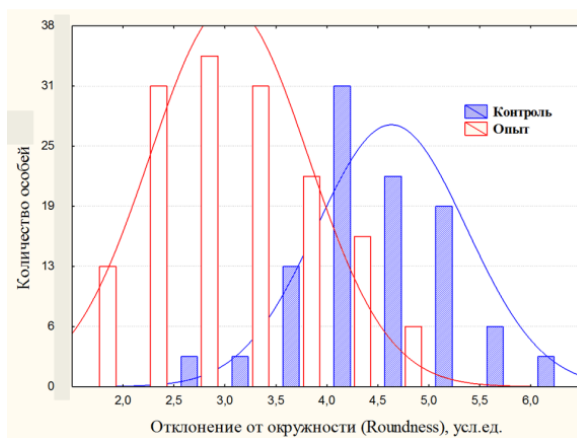


Рис. 1. Количество *S. ambiguum* с разными значениями параметра «Отклонение от округлости (Roundness)» в контроле и после ЭМИ
 $N = 152$ особи в опыте, $N = 100$ особей в контроле

Полученный диапазон охватывает 95% нормального распределения каждого, выбранного для анализа морфометрических изменений, признака. «Физиологическая норма» по показателю Aspect составила $(10,38 \pm 3,70)$ ус. ед., по Diametr(max) – $(0,47 \pm 0,13)$ ус. ед., по Perimeter – $(1,01 \pm 0,35)$ ус.ед, по Roundness – $(4,44 \pm 1,34)$ ус. ед. С использованием данного метода изучены эффекты при разных экспозициях в электромагнитном поле. Всего проанализировано 1200 инфузорий.

Анализ морфометрических изменений после низкоинтенсивного радиочастотного воздействия у *S. ambiguum*. На рис. 2 видно, что уже при 30-минутной экспозиции в ЭМП выявились значимые изменения морфометрических показателей по сравнению с контролем. Морфометрические нарушения коррелируют со снижением подвижности у этих простейших при облучении в аналогичном режиме (Сарапульцева и др., 2009; 2011), т.е. отражают физиологические радиационно-индуцированные радиочастотным полем изменения. Эффект, обнаруженный сразу после воздействия, сохранялся как минимум в двух-трех поколениях простейших (до 7 сут, клеточный цикл *S. ambiguum* 2 – 3 сут) и нивелировался к пятому-седьмому поколению (к 14 сут). Эффект экспозиции 360 мин на 14 сут не исследовался. Описанный в литературе морфо-физиологический эффект, индуцированный острым γ -облучением у *S. ambiguum* в дозах 0,1 – 1000 Гр, значительно возрастал на четвертые и седьмые сутки.

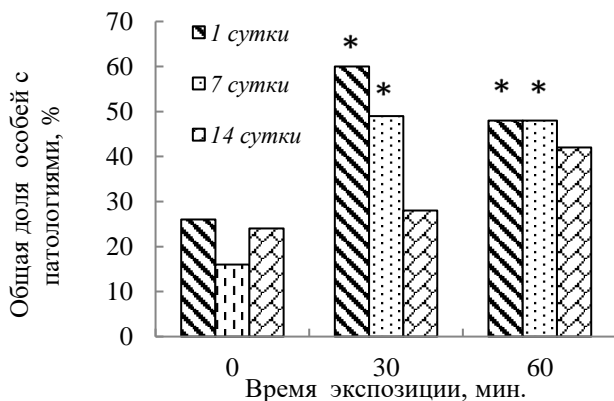


Рис. 2 – Динамика изменения морфометрических параметров у контрольных и облученных в низкоинтенсивном ЭМП инфузорий *S. ambiguum*

* вероятности (P) непараметрического теста Крускала-Уоллиса

1 сутки: Контроль – «30 мин»: $n = 43$, $\chi^2 = 11,79$; $df=1$; $P = 0,0005$

Контроль – «60 мин»: $n = 37$, $\chi^2 = 5,19$; $df=1$; $P = 0,001$

Контроль – «360 мин»: $n = 33$, $\chi^2 = 11,79$; $df=1$; $P = 1$

7 сутки: Контроль – «30 мин»: $n = 105$, $\chi^2 = 43,56$; $df=1$; $P = 0,003$

Контроль – «60 мин»: $n = 127$, $\chi^2 = 45,79$; $df=1$; $P = 0,001$

14 сутки: Контроль – «30 мин»: $n = 26$, $\chi^2 = 0,21$; $df=1$; $P = 0,50$

Контроль – «60 мин»: $n = 33$, $\chi^2 = 3,66$; $df=1$; $P = 1$

Анализ нарушения регенерационной активности у планарий *D. tigrina* и *S. mediterranea*. В табл. 1 представлены результаты изменения индекса регенерации в образцах планарий *D. tigrina* после электромагнитного воздействия с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см². Видно, что через 60 и 180 минут нахождения в низкоинтенсивном радиочастотном поле происходит значимое снижение регенерационной активности планарий, выявленное методом прижизненной компьютерной морфометрии на четвертые сутки после декапитации и облучения.

На рис. 3 приведены значения индекса регенерации для выборки планарий *D. tigrina*, облученных в низкоинтенсивном радиочастотном поле. Выявлено, что у планарий *D. tigrina* регенерационная активность снижается как после ионизирующего ($N = 99$; $r = -0,533$; $P = 1,36 \times 10^{-8}$), так и после неионизирующего ($N = 146$; $r = -0,620$; $P = 10^{-15}$) воздействия на организм. Анализ небольшой выборки планарий вида *S. mediterranea* ($n = 48$ для γ -облучения и $n = 57$ – для ЭМИ) выявил лишь тренд снижения регенерационной активности после ионизирующего излучения ($r = 0,008$; $P = 0,96$) и отсутствие эффекта после радиочастотного воздействия ($r = -0,19$; $P = 0,18$). Возможно, планарии вида *S. mediterranea* не подходят

для анализа регенеративной активности, либо для получения значимых результатов надо значительно увеличивать выборку тест-объекта.

Таблица 1. Изменение активности регенерации у планарий *D. tigrina* после облучения с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см²

Время экспозиции	N*	Индекс регенерации ± s.e.m.	Значения теста К-У**	P***
0 (контроль)	54	0,037 ± 0,002	-	-
60 мин	44	0,022 ± 0,002	33,72	1,27 x 10 ⁻⁸
180 мин	48	0,016 ± 0,008	57,80	5,79 x 10 ⁻¹⁴
Тест Крускала-Уоллиса****: 68.78; df=2; P = 1,11 x 10 ⁻¹⁵				
Коэффициент корреляции: N = 146; r = -0,620; P = 10 ⁻¹⁵				

* размер выборки

** значения теста Крускала-Уоллиса (df=1) для сравнения с контрольной группой

*** вероятность отличия с поправкой Бонферрони на множественное сравнение

**** значения теста Крускала-Уоллиса для проверки на гомогенность контрольной и облученных групп

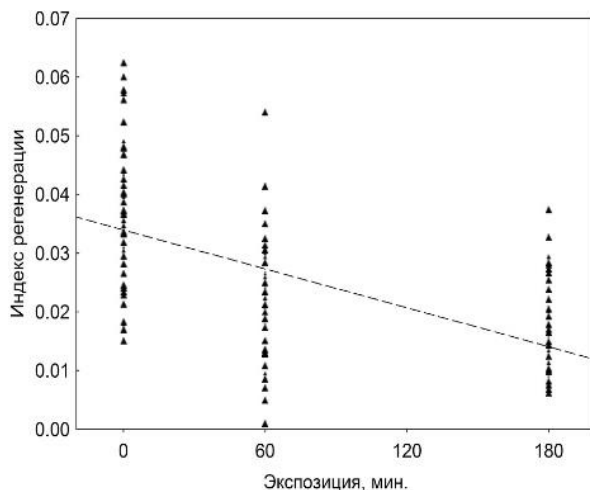


Рис. 3. Изменение регенерационной активности планарий *D. tigrina* после низкоинтенсивного ЭМИ

Тест Крускала-Уоллиса (для ЭМИ): 68.78; df=2; P = 1,11 x 10⁻¹⁵

Анализ регенерационной активности *D. tigrina* в динамике показал, что процесс регенерации восстанавливается к седьмым суткам после

декапитации и облучения планарий. Индекс регенерации для контрольной и опытной (экспозиция 180 мин в ЭМП) выборок составил $(0,049 \pm 0,014)$ и $(0,048 \pm 0,009)$ усл. ед. соответственно, $t_{st} = 0,92$, $p = 0,36$. Следовательно, негативный эффект острого облучения в низкоинтенсивном радиочастотном поле нивелируется со временем. Из литературы известно, что критический период для регенерационной активности планарий приходится на 7 – 10 сут (Тирас и др., 2015). Таким образом, в данном исследовании выявлено, что после острого облучения в низкоинтенсивном радиочастотном поле регенерационный процесс у планарий восстанавливается к седьмым суткам.

В настоящий момент работы по изучению регенерации планарий перешли на новый этап исследований с применением метода проточной цитометрии, поскольку известно, что процесс регенерации планарий зависит от активности пролиферации необластов (Alvarado, 2006; Vaguna, 2012).

Анализ нарушения пролиферативной активности у планарий *S. mediterranea* в радиочастотном поле был проведен методом проточной цитофлуориметрии в программе ModFit 3.0. В образцах необлученных *S. mediterranea* через 6, 8 и 24 ч было обнаружено, что в *G1/G0* фазе клеточного цикла находится около 70 % клеток, в фазе *G2/M* – 8 – 16 % и в фазе *S* – около 18 % (рис. 4 а).

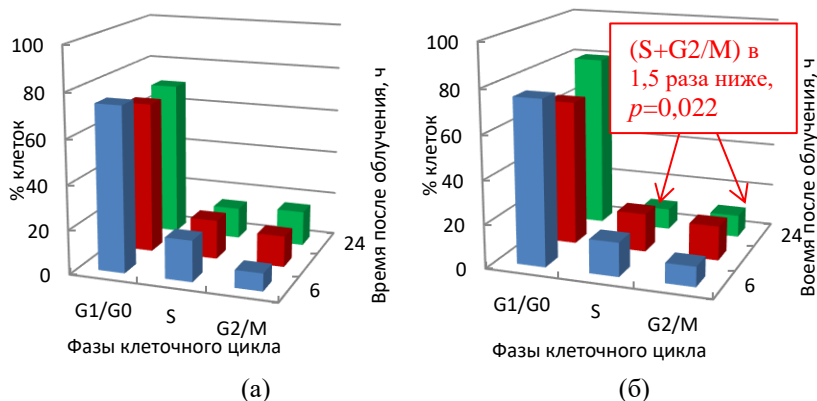


Рис. 4. Динамика изменения пролиферативной активности в образцах планарий *S. mediterranea* (а) в контроле и (б) после радиочастотного облучения экспозицией 180 мин

Пролиферативная активность клеток планарий в первые шесть и восемь часов после облучения в радиочастотном поле не отличалась от наблюдаемой в контроле (рис. 4 б). Через 24 ч после радиочастотного воздействия количество митотических необластов, находящихся на стадии *G1/G0*, увеличилось. При этом количество клеток, характеризующих

скорость пролиферации (стадия S), и клеток, характеризующих индекс пролиферации (стадии $G2/M + S$), снизилось в 1,5 раза по сравнению с контролем.

Известно, что митотическую активность необласты осуществляют за счет обновления неактивного пула, а регулируют этот процесс механизмы апоптоза, запущенные физическими или химическими факторами среды (Perris et al, 2016; Mangel et al, 2016). Сопоставляя результаты анализа регенерационной и пролиферативной активности у планарий *S. mediterranea* можно предположить, что отсутствие выраженного эффекта, но выявление тренда снижения регенерации после γ -облучения связано с нарушением клеточного цикла необластов за счет ареста клеток на стадии $G1/G0$ и/или разным темпом миграции стволовых клеток к поврежденной зоне. После низкоинтенсивного радиочастотного облучения в проведенном нами исследовании обнаружено незначительное ($p = 0,022$) по сравнению с эффектом γ -облучения ($p = 1,54 \times 10^{-8}$) снижение пролиферативной активности у планарий *S. mediterranea* через сутки после воздействия и отсутствие нарушения процесса регенерации на четвертые сутки. Следовательно, нарушение процесса пролиферации не влияет на процесс регенерации.

Анализ жизнеспособности клеток многоклеточного организма после низкоинтенсивного радиочастотного воздействия был далее проведен на другом беспозвоночном животном – лабораторной популяции ветвистоусых рачков *D. magna*.

Анализ выживаемости ракообразных *D.magna* в радиочастотном поле. На рис. 5 приведена динамика выживаемости ракообразных *D. magna* после облучения в низкоинтенсивном радиочастотном поле с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см² с экспозицией по пять суток в ювенильный (1 – 5 сут) и пубертатный (6 – 10 сут) периоды онтогенеза. В каждой выборке по 40 особей. Анализ выживаемости ракообразных *D. magna* показал, что на 8-е сутки происходит первый спад выживаемости в выборке, облученной в ювенильный период, а затем к 15-м суткам выживаемость снижается до 60%. Эксперимент проведен до 21-суточного возраста рачков. Методом лог-ранк теста произведен расчет средней продолжительности жизни *D. magna* в контрольных и облученных выборках.

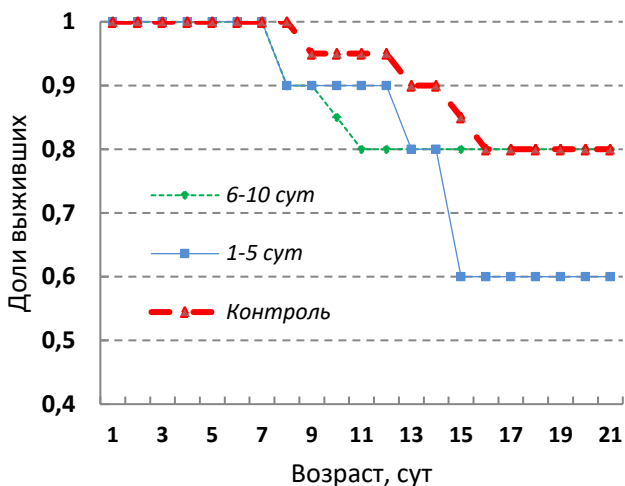


Рис. 5. Выживаемость ракообразных *D. magna* в контроле и после облучения в низкоинтенсивном радиочастотном поле с частотой 900 МГц и ППЭ 100 мкВт/см² с экспозицией пять суток в ювенильный (1 – 5 сутки) и пубертатный (6 – 10 суток) периоды онтогенеза

Для контроля в данном эксперименте средняя продолжительность жизни составила 18,45 дней, для выборки, облученной в возрасте первые-пятые сутки – 17,30 дней, для выборки, облученной на 6-10 сутки – 19,25 дней. Попарное сравнение с контролем по критерию χ^2 не выявило значимых различий в облученных выборках *D. magna*. В группе «Контроль – «1-5 сут»: $\chi^2 = 1,32$; $df=1$; $P = 0,50$; в группе «Контроль – «6-10 сут»: $\chi^2 = 0,01$; $df=1$; $P = 1$. Вероятность рассчитана с поправкой Бонферрони на множественное сравнение.

Из литературы известно, что по критерию выживаемости *D. magna* чувствительна к ионизирующему излучению (Сарапульцева, 2016). Морфо-функциональные показатели *D. magna* изменялись в низкоинтенсивном электромагнитном поле десятиметрового диапазона (Воробьева и др., 2016) и под влиянием факторов диодного облучения (Филенко и др., 2015). Однако нами не выявлен индуцированный низкоинтенсивным радиочастотным полем эффект изменения выживаемости в облученном поколении ракообразных. Возможно, эффект проявится в изменении плодовитости ракообразных или отразится на потомстве, что в настоящем исследовании не изучалось.

МТТ-тест на метаболическую активность клеток после радиочастотного воздействия на *D. magna*. В табл. 2 представлены

результаты изменения МТТ-показателя в единицах оптической плотности (ОП) в образцах ракообразных *D. magna* после облучения.

Таблица 2. Изменение МТТ-показателя (ОП) в образцах ракообразных *D. magna* после радиочастотного облучения

Электромагнитное воздействие				
Время экспозиции	N^*	Оптическая плотность \pm s.e.m.	Значения теста К-У**	P^{***}
0 (контроль)	16	1,03 \pm 0,07	-	-
1-5 сутки	7	0,72 \pm 0,06	5,95	0,03
6-10 сутки	8	0,74 \pm 0,06	6,30	0,02
Тест Крускала-Уоллиса ****: 9,39; df=2; $P = 0,009$				
Коэффициент корреляции: $N = 31$; $r = -0,513$; $P = 0,003$				

* размер выборки

** значения теста Крускала-Уоллиса (df=1) для сравнения с контрольной группой

*** вероятность отличия с поправкой Бонферрони на множественное сравнение

**** значения теста Крускала-Уоллиса для проверки на гомогенность контрольной и облученных групп

В каждом образце было по 50 особей. Таким образом, проанализировано 800 *D. magna* в контроле и 750 – в опыте.

Результаты показали, что при нахождении ракообразных в ЭМП в течение пяти суток в ювенильный (с 1 по 5 сут) и пубертатный (с 6 по 10 сут) периоды онтогенеза происходят изменения, приводящие к снижению МТТ-показателя (оптической плотности) в образцах, полученных от облученных *D. magna*.

Из литературы известно о снижении оптической плотности в образцах *D. magna* в МТТ-тесте после острого γ -облучения (Сарапульцева и др., 2013). Эффект был связан с цитотоксическим действием радиации. Также известно, что МТТ-тест традиционно применяют для количественного анализа пула жизнеспособных клеток, количество АФК, в том числе, короткоживущих супероксид анион-радикалов, инактивацию сукцинатдегидрогеназ и других митохондриальных оксидаз и работу системы антиоксидантных ферментов (Hatok et al, 2009). Поскольку в МТТ-тесте обнаружено снижение оптической плотности облученных образцов ракообразных, можно предположить, что под действием ЭМП происходит гибель части клеток *D. magna*. Однако, этот эффект не приводит к гибели многоклеточного организма при облучении в низкоинтенсивном радиочастотном поле с превышением ПДУ в 10 раз.

Снижение показателей МТТ-теста показывают, что под действием ЭМИ с изучаемыми параметрами, возможно, происходит нарушение метаболической активности *D. magna*, которое может привести к изменению других показателей жизнеспособности вида, таких, например, как снижению плодовитости облученных *D. magna* или отдаленным (в поколениях) эффектам выживаемости.

МТТ-тест на планариях *D. tigrina*. В табл. 3 представлены результаты изменения ОП в образцах *D. tigrina* после облучения.

Таблица 3. Изменение оптической плотности в образцах планарий *D. tigrina* после радиочастотного облучения

Время экспозиции	N^*	Оптическая плотность \pm s.e.m.	Значения теста К-У**	P^{***}
0 (контроль)	25	0,196 \pm 0,010	-	-
60 мин	23	0,163 \pm 0,013	3,76	0,105
180 мин	27	0,128 \pm 0,006	24,46	$1,58 \times 10^{-6}$
Тест Крускала-Уоллиса****: 21,22; df=2; $P = 2,47 \times 10^{-5}$				
Коэффициент корреляции: $N = 75$; $r = -0,501$; $P = 4,60 \times 10^{-6}$				

* размер выборки

** значения теста Крускала-Уоллиса (df=1) для сравнения с контрольной группой

*** вероятность отличия с поправкой Бонферрони на множественное сравнение

**** значения теста Крускала-Уоллиса для проверки на гомогенность контрольной и облученных групп

На рис. 6 приведены значения ОП для выборки планарий, облученных в низкоинтенсивном радиочастотном поле.

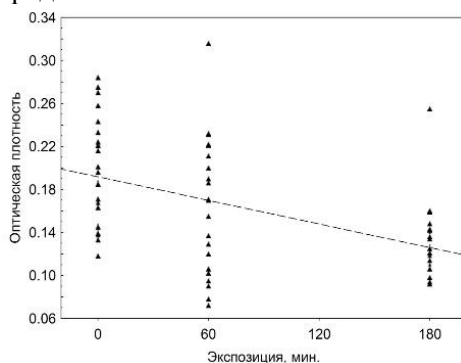


Рис. 6. Изменения оптической плотности (МТТ-показателя) в образцах планарий *D. tigrina* после экспозиций в низкоинтенсивном ЭМИ

Тест Крускала-Уоллиса (для ЭМИ): 21,22; df=2; $P = 2,47 \times 10^{-5}$

Видно, что снижение ОП в облученных образцах планарий происходит после 180-минутной экспозиции. Таким образом, МТТ-тестом выявлено индуцированное низкоинтенсивным радиочастотным полем снижение пула жизнеспособных клеток и метаболической активности у планарий *D. tigrina*.

Анализ электрофизических и химических характеристик воды при облучении гидробионтов в радиочастотном поле. На рис. 7 видно, что ни действительная $Real(\epsilon)$, ни мнимая $Imagin(\epsilon)$ составляющие комплексной диэлектрической проницаемости воды не изменились при культивировании в ней *D. magna* и оставались близки к расчетным значениям комплексной диэлектрической проницаемости (КДП) в частотном интервале от 900 до 2900 МГц.

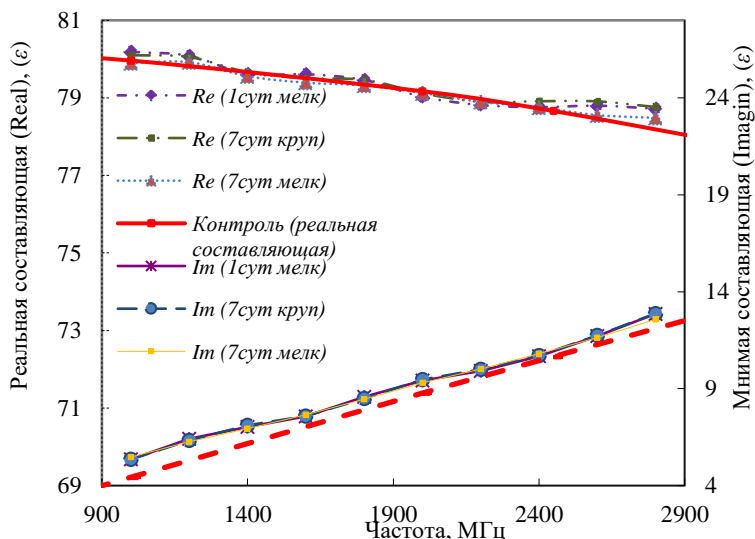


Рис. 7 – Частотная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости воды при культивировании в ней новорожденных (мелкие) и 20-суточных (крупные) ракообразных *Daphnia magna* в течение 1 сут и 7 сут

Здесь же, для сравнения, приведены расчетные данные о диэлектрических параметрах пресной воды (*Контроль* (реальная составляющая, $Real$) и *Контроль* (мнимая составляющая, $Imagin$) при $t = 20$ °C в диапазоне 900 – 2900 МГц, полученные с помощью теоретической модели, используемой при оценке результатов микроволнового зондирования поверхности Земли из космоса (Meissner, 2004). Неизменным остался и тангенс угла диэлектрических потерь,

который представляет собой отношение мнимой и действительной составляющих КДП. Измеренная величина статической удельной электрической проводимости (УЭП) исходной воды составила 0,058 См/м.

Согласно проведенным измерениям, после недельного культивирования *D. magna* УЭП воды повысилась до 0,067 См/м. После суток культивирования изменился до 0,060 См/м. Незначительные изменение УЭП можно объяснить активным поступлением в воду продуктов метаболизма рачков – фрагментов органических субстанций, кислот, солей, которые подвергались гидролизу и разложению

Культивирование *D. magna* в течение недели привело к незначительному повышению перманганатной окисляемости, концентрации ионов аммония и общей минерализации, что обусловлено поступлением в воду продуктов метаболизма рачков. Эксперимент показал, что жизнедеятельность *D. magna* не приводит к изменению физико-химических характеристик культуральной среды, облученной в диапазоне радиочастот до 2900 МГц.

В главе **Заключение** обобщены полученные в диссертационном исследовании закономерности формирования морфо-функциональных эффектов у представителей гидробионтов из разных систематических групп. Анализ полученных в диссертационном исследовании эффектов радиочастотного воздействия на гидробионтов из разных филогенетических групп: инфузорий *S. ambiguum*, планарий *D. tigrina*, *S. mediterranea* и ракообразных *D. magna*, позволил выявить общие закономерности, отраженные в выводах.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный метод компьютерной морфометрии применительно к инфузориям *S. ambiguum* является эффективным в изучении биоэффектов, вызванных электромагнитным воздействием. Облучение простейших в дозах 0,09 и 0,18 Дж/см² (экспозиции 30 и 60 мин) в низкоинтенсивном ЭМП с превышением ПДУ в 5 раз приводит к нарушению их морфометрических показателей. Эффект сохраняется минимум в двух поколениях инфузорий и нивелируется к третьему-пятому поколению.

2. Облучение планарий *D. tigrina* в дозах 0,36 и 1,08 Дж/см² (60 и 180 мин) в низкоинтенсивном ЭМП с превышением ПДУ в 10 раз приводит к снижению их регенерационной активности. Эффект нивелируется к 7 сут.

3. Облучение в ЭМП (1,08 Дж/см², 180 мин) с превышением ПДУ в 10 раз вызывает нарушение пролиферативной активности у планарий *S. mediterranea* через сутки после воздействия. Эффект не отражается на регенерации *S. mediterranea* в отдаленные сроки.

4. Облучение рачков *D. magna* в ювенильный и пубертатный периоды в низкоинтенсивном ЭМП (43,2 Дж/см², 5 сут) с превышением ПДУ в 10 раз не вызывает снижения их выживаемости к 21-суточному возрасту.

5. Облучение в ЭМП с превышением ПДУ в 10 раз приводит к снижению метаболической активности у ракообразных *D. magna* и у планарий *D. tigrina* в ранние сроки после воздействия. Эффект не отражается на выживаемости рачков и регенерационной активности планарий в отдаленные сроки.

6. Обнаруженные биологические эффекты не связаны с поступлением в воду продуктов жизнедеятельности тест-организмов и изменениями электрофизических и химических характеристик культуральной среды, облученной в диапазоне радиочастот до 2900 МГц.

7. Исследуемые эффекты низкоинтенсивного электромагнитного воздействия с частотой 900 МГц и ППЭ 50 и 100 мкВт/см² имеют общие закономерности у простейших и беспозвоночных животных: кратковременное нарушение морфо-функциональных показателей, которое нивелируется в отдаленные сроки в облученном поколении у долгоживущих видов (планарии, дафнии) и через два – три поколения у короткоживущего вида (инфузории).

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК, и международных изданиях

1. **Ускалова, Д.В.** Применение метода компьютерной морфометрии в исследовании биологического действия низкоинтенсивного радиочастотного излучения на простейших / **Д.В. Ускалова**, М.М. Баранова, Е.И. Сарапульцева, Ю.В. Иголкина // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2013. – №. 3. – С. 48-52.

2. **Uskalova, D.V.** Intravital Computer Morphometry on Protozoa: A Method for Monitoring of the Morphofunctional Disorders in Cells Exposed in the Cell Phone Communication Electromagnetic Field) / **D.V. Uskalova**, Yu.V. Igoalkina, E.I. Sarapultseva // *Bullet. experimental biology and medicine.* – 2016. – V. 161. – No 4. – P. 548-552.

3. **Ускалова, Д.В.** Стабильность физико-химических характеристик культуральной воды при тестировании ракообразных *Daphnia magna* в лабораторных экспериментах / **Д.В. Ускалова**, В.Н. Тихонов, Ю.Д. Соколова [и др.] // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. – № 12. – С. 23-30.

4. Устенко, К.В. Отдаленные биологические эффекты низкоинтенсивного радиочастотного облучения *Daphnia magna* в разные

периоды онтогенеза / К.В. Устенко, **Д.В. Ускалова**, Е.И. Сарапульцева // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2017. – № 4. – С. 34-41.

5. Sarapultseva, E. Medical-biological aspects of radiation effects in *Daphnia magna* / E. Sarapultseva, N. Savina, **D. Uskalova**, K. Ustenko // J. of Physics: Conf. Series. – 2017. – 784 (1). – P. 1-6.

6. Савина, Н.Б. Использование МТТ-теста для изучения отдаленных эффектов острого γ -облучения у ракообразных *Daphnia magna* / Н.Б. Савина, **Д.В. Ускалова**, Е.И. Сарапульцева // Радиация и риск. – 2018. – Т. 27. – № 1. – С. 86-93.

В научных сборниках и материалах конференций

7. **Ускалова, Д.В.** Сравнение цитотоксического эффекта ЭМИ у *Daphnia magna* и *Dugesia tigrina* / **Д.В. Ускалова**, Е.С. Маркина, К.В. Устенко // В кн.: Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докл. I междунар. научной конференции. Под общ. ред. А.А. Удаловой. – 2017. – С. 235-237.

8. **Ускалова, Д.В.** Анализ нарушения митохондриальной активности у планарий *Dugesia tigrina* после низкоинтенсивного радиационного воздействия / **Д.В. Ускалова**, Е.С. Маркина // В кн.: Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии: Матер. международного симпозиума, МГУ, 25–28 октября 2016 г. – М.: ГЕОС, 2016. – С. 226-228.

9. Сарапульцева, Е.И. Анализ отдаленных радиационно-индуцированных биохимических эффектов у ракообразных в нескольких поколениях / Е.И. Сарапульцева, **Д.В. Ускалова**, Ю.В. Иголкина // В сб.: Труды регион. конкурса проектов фундам. научных исследований. Вып. 21. – Калуга: АНО КРНЦ, 2016. – С. 282-286.

10. **Ускалова, Д.В.** Трансгенерационные нарушения митохондриальной активности *Daphnia magna* после низкодозового γ -облучения в малых дозах / **Д.В. Ускалова**, Н.Б. Савина, Е.И. Сарапульцева // В кн.: 20-я Междунар. школа-конферен. молодых ученых «Биология – наука XXI века». – Пушино: ПНЦ, 2016. – С. 92-93.

11. Устенко, К.В. Изменение демографических и биохимических показателей у *Daphnia magna* при хроническом действии ЭМП базовых станций сотовой связи / К.В. Устенко, **Д.В. Ускалова**, Е.И. Сарапульцева // В кн.: Техногенные системы и экологический риск: Тезисы докладов XIII регион. научной конференции. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2016. – С. 135-137.

12. Устенко, К.В. Отдаленные биологические эффекты низкоинтенсивного радиочастотного облучения *Daphnia magna* в разные периоды онтогенеза / К.В. Устенко, **Д.В. Ускалова**, Е.И. Сарапульцева // В

кн.: Биодиагностика и оценка качества природной среды: подходы, методы, критерии и эталоны сравнения в экотоксикологии». 25-28 октября 2016 г. – М.: ГЕОС, 2016. – С. 400.

13. Савина, Н.Б. Изменения митохондриальной активности в поколениях *Daphnia magna* после γ -облучения / Н.Б. Савина, **Д.В. Ускалова**, Сарапульцева Е.И. // В кн.: Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов XIII региональной научной конференции. 2016. – С. 101-103.

14. **Ускалова, Д.В.** Оценка возможных изменений физических и химических характеристик воды при культивировании в ней мелких гидробионтов / **Д.В. Ускалова**, Е.В. Богачева, А.В. Тихонов [и др.] // Сб. материалов VII Международного конгресса «Слабые и сверхслабые поля и излучения в биологии и медицине» 7-11 сентября 2015 г. – СПб., 2015. – С. 99.

15. Баранова, М.М. Действие низкоинтенсивного радиочастотного излучения на регенерацию планарий / М.М. Баранова, **Д.В. Ускалова**, Е.И. Сарапульцева // В кн.: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2012 аннотации докладов: в 3 томах. – 2012. – С. 134.

16. **Ускалова, Д.В.** Анализ трансгенерационных изменений у спиростом после γ -облучения в малых для объекта дозах / **Д.В. Ускалова**, Ю.В. Иголкина // В кн.: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2014. Аннотации докладов: в 3-х томах. – 2014. – С. 164.

17. Ускалова, Д.В. Экспресс-метод компьютерной морфометрии для ранней диагностики электромагнитного воздействия на организм / Д.В. Ускалова, Е.И. Сарапульцева // В кн.: Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015 Аннотации докладов: в 3-х томах. – 2015. – С. 63.

18. Бичурина, Ю.В. Изменение биохимической активности у *Daphnia magna* в радиочастотном поле с разной плотностью потока энергии / Ю.В. Бичурина, **Д.В. Ускалова**, Н.В. Халецкая // В кн.: Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов XII Региональной научной конференции. – 2015. – С. 132-133.

19. Ускалова, Д.В. Изменение биохимического показателя у *Daphnia magna* под действием разных факторов / **Д.В. Ускалова**, Ю.В. Бичурина // В кн.: Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов XII Региональной научной конференции. – 2015. – С. 166-167.

20. Сарапульцева, Е.И. Молекулярно-генетические механизмы формирования немишеных эффектов облучения на альтернативных моделях / Е.И. Сарапульцева, **Д.В. Ускалова**, Ю.В. Иголкина // В сб.: Труды регионального конкурса проектов фундаментальных научных исследований Калуга, 2017. – С. 240-245.

21. **Ускалова, Д.В.** Влияние радиационного фактора на пролиферативную активность клеток планарий *Schmidtea mediterranea* / **Д.В. Ускалова**, О.Н. Матчук, Е.И. Сарапульцева // В кн.: Техногенные системы и экологический риск. Тезисы докладов II Международной (XV Региональной) научной конференции. Под общ. ред. А.А. Удаловой. – 2018. – С. 395-397.

22. **Ускалова, Д.В.** Анализ нарушения пролиферативной активности планарий *Schmidtea mediterranea* при остром облучении гамма-квантами / **Ускалова Д.В.** // В кн.: Современные проблемы физики и технологий VII Международная молодежная научная школа-конференция. Тезисы докладов. – 2018. – С. 138-139.

Редактор З.И. Сныкова
Компьютерная верстка автора

ЛР N 020713 от 27.04.1998

Подписано к печати	15.11.2018	Формат бумаги 60x84/16
Печать ризограф	Бумага KYMLUX	Печ.л. 1,5
Заказ N	Тираж 100 экз.	Цена договорная

Отдел множительной техники ИАТЭ
249040, г. Обнинск, Студгородок, 1