

На правах рукописи



ЛАВРЕНТЬЕВА ГАЛИНА ВЛАДИМИРОВНА

**РАДИОБИОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДА
ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПО КРИТИЧЕСКИМ
НАГРУЗКАМ**

Специальность 1.5.1 – Радиобиология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора биологических наук

Калуга – 2021

Работа выполнена на базе Калужского филиала федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» и Обнинского института атомной энергетики – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный консультант:

Сызыныс Борис Иванович – доктор биологических наук, профессор, профессор Отделения ядерной физики и технологий Обнинского института атомной энергетики – филиала федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Официальные оппоненты:

Панов Алексей Валерьевич – доктор биологических наук, профессор РАН, главный научный сотрудник лаборатории математического моделирования и программно-информационного обеспечения Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии»

Позолотина Вера Николаевна – доктор биологических наук, старший научный сотрудник, заведующая лабораторией популяционной радиобиологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук

Мамихин Сергей Витальевич – доктор биологических наук, Ведущий научный сотрудник кафедры радиэкологии и экотоксикологии факультета почвоведения Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун»


Защита диссертации состоится «21» октября 2021 года в 12 часов 30 минут на заседании Диссертационного совета Д 462.001.04 по адресу: 123182, Москва, ул. Живописная, д. 46, Тел. +7(495)190-96-98

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Российской Федерации – Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России

Автореферат разослан «__» _____ 2021 года

Ученый секретарь

Диссертационного совета, Д 462.001.04,
доктор медицинских наук



Н.К. Шандала

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Обеспечение радиационной безопасности в настоящее время рассматривается как с точки зрения влияния на человека, так и на биоту. Вопросами оценки радиационного воздействия в рамках антропоцентрической и экоцентрической стратегии радиационной защиты занимаются авторитетные международные организации, включая МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН. При этом МКРЗ (ICRP, 2008, 2009, 2014) указывает на необходимость обеспечить прямые доказательства защищенности не только человека, но и живых организмов при разработке стратегии радиационной безопасности окружающей среды, что также отражено и в Международных основных нормах безопасности МАГАТЭ (IAEA, 2011). В РФ требования защиты окружающей среды от радиационного воздействия отражены в ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 N 7-ФЗ. Таким образом, экоцентрический принцип нормирования радиационного фактора приобретает все большую актуальность (Pentreath, P.J., 1999; Алексахин Р.М., 2006, 2010; Ильин Л.А. и др., 2015; Алексахин Р.М. и др., 2015). В основе оценки радиационного воздействия на биоту лежит предложенная МКРЗ концепция «условных (референтных) животных и растений» (ICRP, 2008) и предложенный Комиссией набор референтных видов, который не является окончательным и требует расширения. При этом научное обоснование референтных видов посредством экспериментальных и аналитических исследований актуально для развития эконцентрической концепции.

Следует отметить, что в настоящее время надежным инструментом нормирования загрязнения окружающей среды, в том числе и радиоактивного, является оценка риска (de Jongh N., 1990; Демидова О.А., 2007; Практические рекомендации..., 2015). При этом методы оценки риска для здоровья человека достаточно хорошо проработаны и научно обоснованы, что находит своё подтверждение в существующих руководствах (Р 2.1.10.1920-04, 2004; Technical Guidance..., 2003) и научных исследованиях (Шафранский И.Л. и др., 2009; Коренков И.П. и др., 2013; Рахманин Ю.А. и др., 2002; Ильин Л.А. и др., 2016). Однако при оценке экологического риска на данный момент не существует единых методологических подходов. Особо остро эта проблема стоит при оценке радиационного риска. Таким образом, необходимость разработки новых и усовершенствования существующих методов при оценке радиационного экологического риска продиктована множеством противоречий, включая терминологический аспект и интерпретацию оценок, что обуславливает актуальность подобных разработок.

Степень разработанности проблемы. Работы в области оценки экологического риска впервые появились в 1980-х гг. в США (NRC, 1983) и были ориентированы на оценку химического воздействия на представителей биоты. В дальнейшем методам и методологическим подходам при оценке экологического риска, ориентированного на последствия воздействия

стрессоров разного генезиса на природную среду, посвящены многочисленные работы (Higher-tier Aquatic Risk., 1998; Treweek J., 1999; Directive 2001/82/EC, 2001; Integrated Risk Assessment, 2007; Демидова О.А. и др., 2007; Suter G.W., 2008; Степанова Н.Ю., 2008; Greenberg M. et al., 2015). При этом в большинстве исследованиях экологический риск оценивается для критических компонент экосистем, тогда как методы в области оценки воздействия стрессовых факторов на экосистемном уровне находятся в стадии становления. Отсутствие единых методов затрудняет развитие концепции оценки экологических рисков в условиях воздействия радиационного фактора. Безусловно, в области радиационной защиты биоты существует достаточно обширный структурированный научный материал. На изучение воздействия ионизирующего излучения на биоту направлен ряд международных проектов, включая EPIC, FASSET, EMRAS, EMRAS II, ERICA, PROTECT, STAR. Однако остается ряд дискуссионных вопросов при оценке воздействия радиационного фактора на биоту, в том числе и при оценке радиационных экологических рисков.

Следует отметить, что радиационный экологический риск оценивается на основе порогового действия радиации (Алексахин Р.М., 2006; Крышев И.И. и др., 2013). При этом до сих пор не принят единый критерий безопасности биоты при воздействии радиационного фактора (Алексахин Р.М., 2006). Например, международными проектами ERICA и PROTECT рекомендован для всех организмов предел безопасности – 10 мГр/час (ERICA, 2003; Крышев И.И. и др., 2018). МКРЗ, в свою очередь, предлагает дифференцированный подход с диапазоном безопасного уровня радиационного воздействия от 0.1 до 10 мГр/сут (ICRP, 2008). Поликарпов Г.Г. разработал шкалу дозовых нагрузок на биоту, которая включает шесть зон, где проявляются радиационно-индуцированные эффекты в природных популяциях (Поликарпов Г.Г., 2006; Алексахин Р.М., 2006). Крышев И.И. с соавторами (Крышев И.И. и др., 2013) представили шкалу проявления радиационных эффектов в диапазоне облучения биоты от 10^{-6} до 1 Гр/сут.

Существующие методы для оценки радиационных экологических рисков носят в основном детерминистский характер и предполагают учет отношения дозовой нагрузки на биоту к величине критерия риска или сравнения с определенной величиной (ICRP 108, 2008; Крышев И.И. и др., 2017; U.S. DOE-STD-1153-2002, 2002). Однако применение таких подходов при оценке риска критикуется (Crane M. et al., 2004; Sander P. et al., 2006; Удалова А.А. и др., 2013). Сочетание детерминистских и вероятностных методов при оценке радиационных экологических рисков находит свое применение в «Интегрированном подходе к оценке и управлению рисками для природной среды, возникающими при воздействии ионизирующей радиации» (Howard B.J. et al., 2008), который сопровождается внедрением программного обеспечения ERICA Tool. Несмотря на то, что интегрированный подход является наиболее развитым при оценке радиационных рисков, его

применение также влечет ряд недостатков при анализе экспериментальных данных.

В международной практике при оценке радиационных рисков рекомендуется использовать «условные (референтные) животные и растения» из предложенного набора МКРЗ (ICRP, 2008, 2009, 2014). Однако предложенный набор является дискуссионным, что диктует необходимость дальнейших исследований, направленных на обоснование новых референтных видов с учетом особенностей изучаемой экосистемы и радиоэкологической обстановки, что не противоречит рекомендациям МКРЗ. Экоцентрическая концепция радиационной защиты биоты, частью которой является и оценка радиационного экологического риска, получает развитие в Публикациях МКРЗ (ICRP, 2009; ICRP, 2014). Следует отметить и вклад российских ученых в развитие экоцентрической стратегии и методов оценки радиационного экологического риска, что отражено в коллективной монографии специалистов ИБРАЭ РАН, НПО «Тайфун», МРНЦ им. А.Ф. Цыба, ВНИИРАЭ, НИИ ЭЧ и ГОС им. А.Н. Сысина, НТЦ ЯРБ Ростехнадзора (Практические рекомендации..., 2015).

Таким образом, в настоящий момент остается необходимость дальнейших радиобиологических и радиоэкологических исследований для разработки новых и усовершенствования существующих методов оценки радиационного риска на экосистемном уровне.

Целью диссертационной работы является разработка метода количественной оценки экосистемного риска при хроническом радиоактивном загрязнении и апробация метода на территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

— изучить последствия хронического радиационного воздействия на референтные показатели популяций наземных моллюсков, обитающих в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов;

— изучить влияние радиоактивного загрязнения почвы на ферментативную активность, включая уреазную, дегидрогеназную, инвертазную и каталазную активность почв;

— разработать алгоритм и выполнить дозиметрические расчеты внешнего и внутреннего облучения моллюска для различных геометрий приемника и источника излучения;

— разработать метод количественной оценки риска для экосистем, подвергшихся радиоактивному загрязнению;

— оценить экологический риск для территории исследования посредством разработанного метода.

Научная новизна. Впервые разработан метод оценки радиационного экологического риска на основе критических нагрузок при хроническом

радиоактивном загрязнении наземной экосистемы. Метод апробирован на радиоактивно загрязненной территории.

Впервые получены экспериментально обоснованные результаты по расчетной схеме, основным допущениям, обоснованию параметров облучения моллюска и расчетам мощности поглощенной дозы для моллюсков в среде MCNP5. Впервые установлены достоверные радиационно-индуцированные эффекты в условиях хронического облучения ^{90}Sr у наземного моллюска *Fruticicola fruticum* M., включая изменение морфологического показателя (высота раковины) и уровня белков-металлопротеинов (белков-МТ) в диапазоне мощности поглощенной дозы от 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год.

В природных условиях установлено степенное изменение коэффициента накопления ^{90}Sr раковинами моллюсков в зависимости от удельной активности радионуклида в крапиве двудомной (*Urtica dioica* L.).

На основании многолетних природных исследований приводится научное обоснование наземного моллюска *F. fruticum* M. как претендента на включение в список референтных видов для оценки радиационного воздействия на наземную экосистему. Впервые установлены коэффициенты дозового преобразования для облучения наземного моллюска по $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ от растительности и раковины (как внешнего источника облучения), а также от почвы с учетом обитания организма на почве и при заглублении в почву в состоянии анабиоза.

Впервые показана чувствительность каталазной ферментативной активности почв к радиоактивному загрязнению ^{90}Sr и установлено достоверное изменение каталазной активности в диапазоне содержания радионуклида в почве от 1.83 ± 0.02 до 5203 ± 89 Бк/кг.

Впервые проводится сравнительный анализ радиационного воздействия на население и биоту при возможных аварийных ситуациях. При этом установлено, что пролонгированное поступление радионуклидов в почву и водные объекты изучаемой территории оказывает большее радиационное воздействие на референтный вид (наземного моллюска *F. fruticum* M.), чем на человека.

Теоретическая значимость заключается в получении новых данных по формированию радиационно-индуцированных эффектов у представителей биоты в условиях хронического облучения в природных условиях; показателям накопления ^{90}Sr в компонентах наземной экосистемы. Полученные экспериментальные результаты вносят вклад в расширение существующих баз данных о радиационных эффектах у представителей биоты.

Практическая значимость. Предложенный метод оценки риска позволяет выполнить количественную оценку влияния радиационного фактора на наземные экосистемы, что вносит вклад в расширение эоцентрической концепции радиационной защиты. Разработанный метод может внести существенный вклад в развитие технологий мониторинга и

прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации её загрязнения, которые отнесены к критическим технологиям РФ согласно Указу Президента РФ № 899 от 7 июля 2011 г. «Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации».

Полученные результаты дозиметрических расчетов для малого биологического объекта (наземного моллюска), обоснование входных параметров источника и приемника излучения, коэффициенты дозового преобразования для $Sr^{90}+Y^{90}$ при оценке облучения моллюска вносят вклад в решение дозиметрических задач, сформулированных МКРЗ для развития концепции радиационной безопасности биоты.

Применение наземного моллюска в качестве референтного вида для оценки радиационного воздействия на окружающую среду развивает концепцию радиационной защиты биоты с учетом климатических, радиоэкологических и других специфичных особенностей территорий.

Полученные в диссертационной работе научно обоснованные решения вносят вклад в развитие существующих подходов к оценке радиационных экологических рисков, могут быть учтены при разработке отечественных и международных нормативных документов в области радиационной безопасности биоты.

Практическая значимость определяется возможностью разработки на основе установленных закономерностей более совершенных прогностических моделей радиационного воздействия на биоту.

Практическая значимость работы также определяется наличием свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ: Экориск: система анализа экологических данных, САМИР: система анализа миграции радионуклидов. Результаты диссертационной работы включены в учебный процесс КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана (дисциплины «Радиационная безопасность», «Экология техносферы»), ИАТЭ НИЯУ МИФИ (дисциплина «Техногенные системы и экологический риск», «Радиационная биология и радиоэкология»).

Методология и методы исследования. Объектами исследования выбраны компоненты наземной экосистемы, включая почву, наземных моллюсков улитку кустарниковую (*F. fruticum* M.) и янтарку обыкновенную (*Succinea putris*), крапиву двудомную (*U. dioica* L.), и водные объекты, включая грунтовые воды наблюдательных скважин и поверхностные воды болота и ручья. Оценивали последствия хронического облучения β -излучения ^{90}Sr компонент наземной экосистемы, учитывая ферментативную активность почв, коэффициенты накопления в системе «почва – крапива – наземный моллюск», морфологические показатели наземного моллюска и уровень белков-МТ в мягких тканях животного. Оценка изменения уровня белков-МТ в мягких телах моллюска также проведена при облучении животного в

лабораторных условиях. В диссертационной работе представлен метод оценки радиационного риска для наземной экосистемы в условиях хронического радиоактивного загрязнения, который сочетает вероятностные и детерминистские подходы.

Отличительной особенностью предлагаемого метода от существующих методов является оценка риска посредством определения критических нагрузок на референтные виды и показатели экосистемы. При этом в качестве критической нагрузки рассматривается экспериментально обоснованное радиационно-индуцированное изменение конкретного референтного показателя. В международной же практике определение экологического риска проводится с учетом допустимых уровней радиационного облучения, что может приводить к существенным неточностям ввиду отсутствия единого критерия.

Выбор, обоснование референтного вида и показателей, определение критических нагрузок для оценки радиационного экологического риска осуществлялись посредством многолетних (2010 – 2017 гг.) комплексных исследований в природных условиях. Применение разработанного метода основано на методах пробоотбора и пробоподготовки почв, растительности, наземных моллюсков; математического моделирования; определения морфологических показателей наземных моллюсков; определения уровня белков-МТ в мягких телах моллюсков; определения ферментативной активности почв (уреазной, инвертазной, каталазной, дегидрогеназной), а также дозиметрических методах и инструментальных методах анализа.

Оценка риска проводится на основании установления доли локальных участков с превышением критических нагрузок от общей площади изучаемой территории и сравнением с величиной 95%-ной защищённости экосистемы.

Оценка радиационного риска для населения проводится на основании методологии, предложенной МАГАТЭ (IAEA-TECDOC-1380, 2003).

Положения, выносимые на защиту

1. Разработан метод количественной оценки экосистемного риска в условиях радиоактивного загрязнения окружающей среды, который основан на экспериментальном обосновании референтных видов и определении критических нагрузок на референтные показатели.
2. Наземный моллюск *F. fruticum* М. может быть предложен в качестве референтного вида в биологическом мониторинге при хроническом радиоактивном загрязнении ^{90}Sr наземной экосистемы, основанном на анализе морфологического показателя высоты раковины моллюска, коэффициента накопления радионуклида и уровня белков-МТ в мягких тканях.
3. Коэффициент накопления ^{90}Sr раковинами наземного моллюска *F. fruticum* М. не является константой, его изменение в зависимости от удельной активности радионуклида в крапиве двудомной (*U. dioica* L.) описывается степенной функцией.

4. В идентичных радиоэкологических условиях при учете индексов радиационного воздействия наземный моллюск подвергается большему радиационному воздействию, чем человек, что указывает на необходимость дальнейшего обоснования экоцентрической концепции защиты окружающей среды в условиях повышенного радиационного фона.

Достоверность результатов. Достоверность полученных результатов определяется применением современного оборудования и используемых в мировой научной практике методик, а также большим объемом экспериментальных данных и воспроизводимостью экспериментальных зависимостей изменения референтных показателей в натуральных условиях в течение всего периода исследований. При этом выполнен анализ изучаемых референтных показателей для 3.5 тыс. особей наземных моллюсков, 723 пробы растительности, 805 проб почвы за многолетний (2010 – 2017 гг.) период исследований. Экспериментальные данные были проанализированы посредством современных пакетов статистического анализа (программная среда R).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. В соответствии с формулой специальности 1.5.1 «Радиобиология», охватывающей п. 5 «Проблемы радиочувствительности биологических объектов», п. 8 «Стохастические и не стохастические эффекты, их особенности; зависимости: доза-эффект и время-эффект», п. 9 «Последствия ядерных катастроф. Синдром Чернобыля. Радиоэкология», п. 10 «Принципы и методы радиационного мониторинга, проблемы радиационной безопасности», п. 11 «Отдаленные последствия действия излучений. Хроническое действие радиации», в диссертационном исследовании представлены данные многолетнего радиационного мониторинга; результаты натуральных и лабораторных исследований влияния радиационного фактора на наземного моллюска *F. fruticum* M.; разработан метод оценки радиационного риска для наземной экосистемы в рамках решения проблем радиационной безопасности биоты; проведена оценка влияния β -излучения ^{90}Sr на морфологические показатели, показатели накопления радионуклида и уровень белков-МТ наземного моллюска *F. fruticum* M. при хроническом облучении в малых дозах, а также на биохимические показатели почвы.

Апробация работы. Основные результаты исследований были представлены на: Всероссийской научной конференции «XIV Докучаевские молодежные чтения» (Санкт-Петербург, 2011); Конференции «50 лет общегосударственной радиометрической службе» (Обнинск, 2011); Международной конференции «Безопасность АЭС и подготовка кадров» (Обнинск, 2011, 2013, 2015, 2018); Региональной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2011, 2013, 2014, 2016), Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Техногенные системы и экологический риск» (Обнинск, 2017, 2018);

Научной сессии НИЯУ МИФИ (Москва, 2011, 2013, 2014, 2015); Международной научной конференции «Сахаровские чтения: экологические проблемы XXI века» (Минск, Беларусь, 2012, 2013, 2017, 2018); Международной Пущинской школе-конференции молодых ученых «Биология Наука XXI века» (Пущино, 2012); Всероссийской научно-практической конференции «Геолого-геохимические проблемы экологии» (Москва, 2012); Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем» (Киров, 2012); X Международной научно-практической конференции «Гатищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики» (Тольятти, 2013); Всероссийской научно-практической конференции-выставки с международным участием «Актуальные проблемы региональной экологии и биодиагностика живых систем» (Киров, 2013, 2015); Международной конференции «Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды» (Сыктывкар, 2014); VII Съезде по радиационным исследованиям (радиобиология, радиоэкология, радиационная безопасность) (Москва, 2014); 3rd International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (Barcelona, Spain, 2014); Fourth International Conference, Dedicated to N.W.Timofeeff-Ressovsky and His Scientific School «Modern problems of genetics, radiobiology, radioecology, and evolution» (St.Petersburg, 2015); Third International conference of Radiation and Applications in Various Fields of Research, RAD (Budva, Montenegro, 2015, 2016); Международной конференции «Радиобиология: «Маяк», Чернобыль, Фукусима» (Гомель, Беларусь, 2015); Всероссийской научно-технической конференции «Научные технологии в прибор- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе» (Калуга, 2015); Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (Севастополь, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020); The 1st International Symposium «Physics, Engineering and Technologies for Bio-Medicine» (Moscow, 2016); Second International Conference on Radioecological Concentration Processes (50 year later) (Seville, Spain, 2016); Всероссийской научной конференции «Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития» (Москва, 2017); 4th International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity (Berlin, 2017); Международная научно-техническая конференция «Будущее атомной энергетики» (Обнинск, 2017, 2018, 2020); XLVI международных радиоэкологических чтениях «Современные проблемы радиобиологии и радиоэкологии» (Обнинск, 2017, 2019); VII Всероссийской научной конференции для молодых ученых «Актуальные вопросы биомедицинской инженерии» (Саратов, 2018), а также на НТС Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» (2014).

Результаты исследования получены при выполнении государственных контрактов и грантов под руководством соискателя, включая

Государственный контракт №14.740.11.0193 в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России»; Государственный контракт от 28.03.2014 № Н.46.43.9Б.14.1054 с Госкорпорацией «Росатом»; Грант Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых, Договор № 14.125.13.368-МК; Грант РФФИ №15-38-20142.

Личный вклад диссертанта в работу. Соискателем выполнен основной объем полевых и лабораторных исследований, осуществлен критический анализ существующих методов оценки экологических рисков и предложено новое решение задачи оценки радиационного риска на экосистемном уровне. Комплексный подход к изучению радиационного воздействия на представителей биоты обосновал необходимость привлечения к выполнению исследований специалистов смежных специальностей. Соискатель выполнял все этапы диссертационного исследования, включая формулирование цели, задач, положений и выводов, планирование и проведение исследований, статистический анализ и интерпретацию полученных экспериментальных данных. Соискателем подготовлены публикации в отечественные и международные профильные журналы, полученные результаты представлены на конференциях регионального, всероссийского и международного уровней.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 106 печатных работ, в том числе 18 статей в рецензируемых журналах из перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ; 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ; 1 работа в коллективной монографии; 6 публикаций в изданиях, индексируемых в Scopus и Web of Science. Материалы диссертационного исследования легли в основу двух учебно-методических пособий для студентов ВУЗов, автором которых является соискатель.

Структура и объем диссертации. Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 273 страницах машинописного текста и содержит введение, 8 глав, заключение, выводы, а также список использованной литературы, включающий 390 источников, из них 144 на иностранном языке. Диссертация содержит 32 рисунка, 31 таблицу и 5 приложений.

Автор выражает особую благодарность научному консультанту доктору биологических наук, профессору Сынзынысу Борису Ивановичу за поддержку в выполнении работы и идейное вдохновение. Признательна кандидату технических наук О.А. Мирзеабасову за консультации по интерпретации и статистической обработке экспериментальных данных. Я благодарю за методическую поддержку коллектив кафедры экологии ИАТЭ НИЯУ МИФИ и лично заведующую кафедрой доктора биологических наук А.А. Удалову.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, положения, выносимые на защиту, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, а также степень достоверности и апробация результатов исследования.

Глава 1. Анализ методов оценки экологического риска и риска здоровью человека при воздействии радиационного и химического факторов (Обзор литературы)

На основе анализа отечественной и иностранной научной литературы рассмотрены научные достижения и современные тенденции в области радиационной защиты биоты и человека, оценки радиационного риска (Алексахин Р.М., 1982; Crane M. et al., 2004; Алексахин Р.М., 2006; Brown J.E. et al., 2008; Рахманин Ю.А. и др., 2002, 2014; Ильин Л.А. и др., 2015, 2016; Ильин Л.А., 2016; Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., 2018 и др.). Представлен раздел, посвященный развитию эгоцентрической концепции радиационной защиты, неотъемлемой частью которой является оценка воздействия радиационного фактора на биоту (Pentreath P.J., 1999; Алексахин Р.М., 2006; ICRP, 2008, 2009, 2014; Поликарпов Г.Г., 2000; Казаков С.В., Уткин С.С., 2008; Крышев И.И., Сазыкина Т.Г., 2013; Ильин Л.А. и др., 2015; Алексахин Р.М. и др., 2015 и др.). Выявлены недостатки и дискуссионные аспекты существующих методов оценки радиационного экологического риска, в частности, преобладание детерминистских подходов; несовершенный набор «референтных животных и растений», предложенный МКРЗ; отсутствие единого критерия безопасности биоты; выбор показателей для оценки радиационного воздействия на биоту находится в стадии становления; недостаток исследований для установления зависимости «доза – эффект» у представителей биоты, обитающих в естественной среде в условиях хронического облучения (Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И., 2020).

Глава 2. Метод количественной оценки радиационных рисков по критическим нагрузкам на наземную экосистему

Метод количественной оценки радиационных экологических рисков по критическим нагрузкам на наземную экосистему является развитием существующих подходов к оценке риска. В основу предлагаемого метода положен метод критических нагрузок, который изначально разработан для контроля атмотехногенного загрязнения (UBA, 2004).

Концепция критических нагрузок в рамках оценки экологического риска была нами апробирована для водной экосистемы с учетом химического загрязнения. Объектом исследования являлась экосистема реки Протва. Входными параметрами для оценки риска послужили данные экологического мониторинга и гидробиологических исследований, проводимых на протяжении нескольких лет (Лаврентьева Г.В. и др., 2011; Рева Е.В. и др., 2011).

Предлагаемый метод оценки радиационного экологического риска по критическим нагрузкам включает следующие классические этапы: идентификацию опасности; выявление референтных видов и показателей; определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимостей «доза - эффект» в градиенте нагрузки; оценку экологического риска по критическим нагрузкам и анализ функций риска; анализ неопределенностей (Лаврентьева Г.В. и др., 2013; Лаврентьева Г.В. и др., 2012; Бахвалов А.В. и др., 2012; Lavrentyeva G.V. et al., 2014; Lavrentyeva G.V., 2019). При этом применяются принципиально новые методы и подходы, ранее не рассматриваемые в рамках оценки радиационных рисков. Метод был апробирован на территории расположения хранилища РАО.

Первый этап – идентификация опасности – предполагает определение реципиента воздействия, фактора экологической опасности и оценку экспозиции. Учитывая возможное смешанное (радиоактивное и химическое) загрязнение экосистем изучаемой территории, на данном этапе необходимо проводить комплексные мониторинговые работы и устанавливать звенья между источником загрязнения и реципиентом воздействия.

Второй этап направлен на выявление референтных видов и показателей. При этом возникает необходимость обоснования референтных видов с учетом региональных особенностей исследуемых территорий. Новшеством предлагаемого метода является обоснование и применение наземного моллюска *F. fruticum* М. в качестве референтного вида для оценки риска для наземной экосистемы. Также предложен термин «референтный показатель», изменение которого носит пороговый характер, а пороговое значение выступает в качестве критической нагрузки, что ранее не рассматривалось ни при оценках радиационных рисков, ни при развитии метода критических нагрузок.

Третий этап оценки риска основан на определении и анализе критических нагрузок на основе построения зависимостей «доза – эффект» в градиенте нагрузки. С точки зрения пошаговой оценки радиационных экосистемных рисков данный этап является наиболее дискуссионным, что связано с оценкой дозовой нагрузки на референтные виды и определением критерия радиационной безопасности.

Учитывая несовершенство общепринятых методов оценки мощности поглощенной дозы облучения биоты, в предлагаемом методе дозовая нагрузка на наземного моллюска оценивается с учетом индивидуальных особенностей животного (геометрия тела, характера накопления радионуклидов) и сложившихся радиоэкологических условий посредством разработанного алгоритма дозиметрического расчета методом Монте-Карло.

Следует отметить, что в международной практике оценка радиационного риска на биоту проводится с учетом критериев радиационной безопасности, что может приводить к ошибочным оценкам из-за отсутствия единого критерия. В разработанном методе в качестве критерия безопасности

выступает критическая нагрузка на представителя биоты, которая предусматривает радиационно-индуцированное изменение конкретного референтного показателя его жизнедеятельности. Таким образом, применение метода определения критической нагрузки на референтные показатели референтного вида является одним из возможных вариантов решения проблемы оценки радиационного экологического риска.

Четвертый этап – оценка экологического риска по критическим нагрузкам и анализ функций риска – основан на применении как детерминистских, так и вероятностных методов. Количественная оценка экологического радиационного риска проводится посредством алгоритма, за основу которого принята концепция оценки экосистемных рисков на основе величин критических нагрузок поллютантов (UBA, 2004; Burns D.A., 2008; Демидова О.А., 2007; Башкин В.Н. и др., 2015).

Радиационный риск оценивается посредством расчета и пространственного анализа величин превышений критических нагрузок.

Для этого необходимо построить функцию распределения площади по величине экспозиции, а затем по значению безопасного уровня воздействия вычислить вероятность превышения этого уровня. Построение функции распределения в работе реализовано с использованием ГИС технологий.

Величина воздействия на экосистему оценивается в виде отношения площади исследуемых участков, характеризующихся превышением критических нагрузок, к общей площади участков. Таким образом, выявляется доля площади, которая имеет превышение критических нагрузок. На основании значений N_p (превышение критической нагрузки) рассчитывается вероятность их превышения: $P_i(N_p) > 0$.

Площади исследуемых участков с превышением критических нагрузок на биоту вычисляется посредством ГИС-технологий. Для каждого участка находится функция экологического риска (R_x), которая представляет собой распределение (1):

$$R_x = F(M) = P(p_x < M), \quad (1)$$

где P – вероятность; p_x – случайная величина, характеризующая относительную площадь области, имеющей превышение критических нагрузок ($M(N_p) > 0$).

После этого рассчитывается экологический риск, представляющий собой комплексный показатель, характеризующий вероятность развития неблагоприятных изменений в состоянии экосистемы. Превышение критических нагрузок будет находиться в интервале: $[M_1; M_2]$, ($P = P_2 - P_1$). За приемлемую величину для оценки радиационного риска принят показатель 95%-ой защищенности экосистемы: приемлемым считается такой риск, при котором площадь с превышением критических нагрузок не превышает 5% от общей площади территории исследования. Выбор величины (95%) защищенности экосистемы базируется на методе критических нагрузок,

который положен в основу предлагаемого метода, а также ряде исследованиях (УВА, 2004; Демидова О.А. и др., 2007; Башкин В.Н. и др., 2011).

Пятый этап метода – анализ неопределенностей в оценке экологического риска. Неопределенность результатов оценки экологического риска необходимо выявлять на каждом этапе оценки, что отражено в Главе 7 диссертации.

Глава 3. Объекты и методы исследования

3.1 Экспериментальная площадка для проведения природных радиобиологических и радиоэкологических исследований

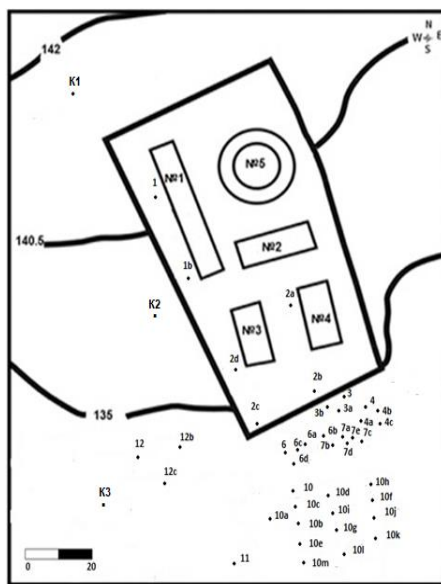
Экспериментальной площадкой для проведения исследований является территория расположения регионального хранилища РАО на севере Калужской области, подвергшаяся радиоактивному загрязнению. Хранилище РАО было создано в 1955 г. В период с 1998 по 1999 гг. обнаружено увеличение удельной активности ^{90}Sr в наблюдательных скважинах, что было объяснено проникновением поверхностных вод в одну из емкостей. При переполнении емкости загрязненная радионуклидами вода поступала за её пределы, что привело к радиоактивному загрязнению прилегающей экосистемы. Площадь исследования составляет 0.54 га и ограничивается ареалом загрязнения почвы радионуклидом ^{90}Sr , выявленным при проведении многолетних исследований.

3.2 Объекты исследования

Объектами исследования являются почва и почвенные ферменты (каталаза, дегидрогеназа, инвертаза, уреазы), водные объекты (грунтовая вода, вода ручья и болота) исследуемой территории, наземные моллюски (улитка кустарниковая (*F. fruticum* M.) и янтарка обыкновенная (*Succinea putris*)), крапива двудомная (*Urtica dioica* L.).

3.3 Методы исследования

Почва. Пробоотбор верхнего 5-ти сантиметрового горизонта почвы осуществлялся методом конверта на 44-х локальных участках изучаемой территории (рис. 1) в период с 2010 по 2017 гг. В почве



№ 1, 2, 3, 4 – емкости для хранения ТРО, №5 – для ЖРО

Рисунок 1 – Карта-схема локальных участков пробоотбора

контрольных участков (K1, K2, K3) удельная активностью ^{90}Sr составляет 1.83 ± 0.02 Бк/кг, что соответствует фоновому значению на территории севера Калужской области, а концентрация химических элементов однородна по сравнению с остальными локальными участками. Физико-химические свойства почв определяли согласно общепринятым методикам (Агрохимическая., 2003; Минеев В.Г. и др., 2001; Вадюнина А.Ф. и др., 1986). Формы нахождения ^{90}Sr и ^{137}Cs определяли методом последовательной экстракции (Павлоцкая Ф.И., 1974). Пробоподготовку почвенных образцов и определение ферментативной активности почв проводили согласно методике (Мелехова О.П. и др., 2010).

Вода. Пробоотбор воды из шести наблюдательных скважин осуществлялся насосом, погружаемым ниже зеркала воды на 0.3 – 0.5 м. Пробоотбор воды поверхностных водных объектов осуществлялся цилиндрическим пробоотборником. Данные радиационного мониторинга водных объектов за период с 1998 по 2009 гг. предоставлены лабораторией радиационной безопасности и охраны окружающей среды ФГУП «ГНЦ РФ – ФЭИ им. А.И. Лейпунского».

Наземные моллюски. Пробоотбор наземных моллюсков осуществляли с почвенно-растительного покрова методом ручного сбора на 44-х локальных участках (рис. 1). Для исследования отбирали особей половозрелой (второй) группы. Морфологические показатели моллюсков измеряли с помощью штангенциркуля под контролем бинокулярного микроскопа марки Motik BA 310 (Motic China Group Co. Ltd. (Китай)). Отделение мягкого тела от раковины проводили методом мацерирования (Стойко Т.Г. и др., 2010). Массу мягкого тела и раковины моллюсков определяли на аналитических весах. Определение уровня белков-МТ в мягких тканях моллюсков осуществляли радиохимическим методом, основанным на замещении ионов металла, хелатированных в МТ, радиоактивным ^{109}Cd (Eaton D.L. et al., 1982). Оценку мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска проводили тремя методами: посредством программного обеспечения ERICA Tool, расчетным методом на основании формул Р. Левинджера и Л.Д. Маринелли и методом Монте-Карло посредством разработанного алгоритма дозиметрического расчета.

Растительность. Крапиву двудомную отбирали на 44 – х локальных участках изучаемой территории (рис. 1). Подготовку растительного материала к измерению удельной активности ^{90}Sr проводили методом сухого озоления.

Определение удельной активности ^{90}Sr в растительности, почве, воде, раковинах моллюсков проводили на сцинтилляционном β -спектрометре «БЕТА-01С» (Россия) по стандартной методике определения содержания ^{90}Sr по β -излучению его дочернего радионуклида ^{90}Y в объектах окружающей среды с предварительным радиохимическим выделением ^{90}Sr (Стронций-90,

2002). **Концентрацию микро- и макроэлементов** в почвенных вытяжках и пробах воды измеряли методом атомной эмиссии с индуктивно связанной плазмой (ICP AES Varian Liberty II, Австралия). **Активность ^{226}Ra , ^{228}Th , ^{137}Cs** в пробах почвы и воды измеряли методом полупроводниковой γ -спектрометрии с германиевым детектором (Canberra, Франция). **Активность ^{40}K** измеряли на сцинтилляционном спектрометре β -излучения «БЕТА-01С».

Удельную активность радионуклидов и концентрацию химических элементов в объектах исследования определяли в трехкратной повторности.

Оценку радиационного риска для населения проводили на основании методологии, предложенной МАГАТЭ (IAEA-TECDOC-1380, 2003).

Статистическую обработку экспериментальных данных проводили с применением программной среды R. Для подбора моделей по экспериментальным данным применялся регрессионный анализ. Уровень доверия по умолчанию равен 95%. Для определения значимости различий между средними значениями изучаемых показателей и контролем использовался t-критерий Стьюдента и U – критерий Манна-Уитни. Функции риска строились с помощью построения функций распределения (функция ecdf () из R) и методов пространственного анализа. Для создания ГИС были использованы программы: ArcView, Surfer, MapInfo, программная среда R. Построение ГИС – карт осуществляли методом пространственной интерполяции. В тексте, рисунках и таблицах по умолчанию представлены средние значения и стандартные ошибки среднего.

Глава 4. Идентификация опасностей

Первым этапом предлагаемого метода оценки экологического риска является идентификация опасности, что предполагает определение реципиента и фактора экологической опасности, а также оценку экспозиции.

4.1 Радиоактивное и химическое загрязнение поверхностных и подземных вод района размещения регионального хранилища РАО

Основными путями воздействия загрязняющих веществ на наземную экосистему изучаемой территории является миграция радионуклидов посредством грунтовых и поверхностных вод. В свою очередь загрязнение водных объектов может являться фактором экологической опасности при оценке риска. В связи с этим определялся уровень химического и радиоактивного загрязнения водных объектов. Концентрация K, Na, Ca, Mg, Sr, Al, Fe, Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Co, Cd, Pb в изучаемых водных объектах не превышает соответствующие показатели ПДК. Так же в поверхностных и подземных водах не наблюдается превышение уровня вмешательства для ^{137}Cs (11 Бк/кг), установленного в (СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009). В связи с тем, что в период исследований установлено превышение уровня вмешательства для ^{90}Sr (4.9 Бк/кг) только для воды ручья и скважины №4, был проведен анализ изменения объемной активности радионуклида в этих объектах за 16 лет (рис. 2). Наиболее контрастные изменения объемной активности радионуклида наблюдаются в пробах воды из наблюдательной

скважины №4. При этом с 2004 по 2014 гг. наблюдается уменьшение объемной активности ^{90}Sr в грунтовых водах, а ее связь с метеоусловиями неопределенная ($r = -0.107$).

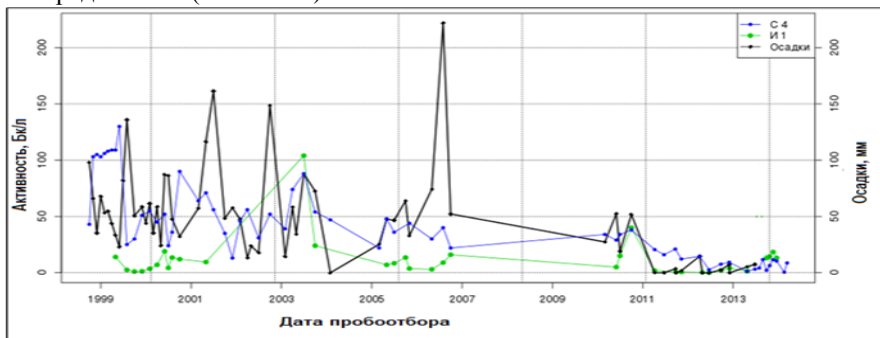


Рисунок 2 – Динамика изменения объемной активности ^{90}Sr в воде скважины №4 (С 4) и ручья (И 1)

С 2003 г. также наблюдается уменьшение объемной активности радионуклида в воде ручья. Учитывая проведенный комплекс защитных мероприятий по предотвращению поступления радиоактивных веществ в окружающую среду, можно ожидать дальнейшее уменьшение объемной активности радионуклида в природных водах, а загрязнение природных вод не рассматривается как фактор экологической опасности. Полученные экспериментальные результаты отражены в публикациях (Лаврентьева Г.В. и др., 2012; Lavrentyeva G.V., 2014; Момот О.А., Лаврентьева Г.В., 2013; Лаврентьева Г.В. и др., 2015; Lavrentyeva G.V. et al., 2016).

4.2 Радиоактивное и химическое загрязнение почвы территории расположения хранилища РАО

Концентрация Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Co, Cd, Pb, Fe в почвах локальных участков отличается однородностью по отношению к контрольному участку и не превышает ПДК для дерново-подзолистых почв. Однако нельзя исключать возможное комбинированное действие химического и радиоактивного загрязнения на формирование эффектов у представителей биоты.

Удельная активность естественных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в почвах локальных участков сопоставима с фоновыми (Радиационная обстановка..., 2016) и не превышает содержание в контроле

Загрязнение почв ^{137}Cs носит локальный характер, что обусловлено его обнаружением в почве участков 1, 1а, 1б возле емкости №1 (рис. 1) в диапазоне удельной активности от 28.4 ± 8.5 до 84.3 ± 25.3 Бк/кг. Не обнаружено превышение допустимой величины удельной активности ^{137}Cs в почве величины 100 Бк/кг, до достижения которой допускается неограниченное использование материалов (ОСПОРБ-99/2010). В почве

изучаемой территории ^{137}Cs преимущественно находится в фиксированной форме (50–53%), а его водорастворимая форма составляет 8 – 9%. В этой связи, ^{137}Cs в рамках диссертационной работы для оценки экологического риска на изучаемой территории не будет рассматриваться в качестве показателя воздействия на референтные виды и всю экосистему в целом.

Радионуклид ^{90}Sr на 69 – 83% находится в почве в своей ионообменной форме и 10–24% – в водорастворимой, что способствует миграции радионуклида на изучаемой территории с возможным расширением площади радиоактивного загрязнения. На основе данных радиоэкологического мониторинга почв, проведенного в период с 2010 по 2017 гг., установлено, что удельная активность радионуклида ^{90}Sr в поверхностном 5-сантиметровом слое почвы возле неаварийных емкостей (участки 1, 1а, 1b, 2, 2с) и участков, находящихся в стороне от тока грунтовых вод (12, 12b, 12с) достигала максимум 100 Бк/кг. Однако в почве возле аварийной емкости №4 (участок 2а) и на территории, в сторону которого направлен ток грунтовых вод от этой емкости (участок 2d) наблюдается увеличение удельной активности радионуклида в период с 2010 по 2014 гг. примерно в 8 раз (рис. 3). При этом отмечается нарастание градиента концентрации ^{90}Sr в направлении от источника загрязнения (аварийной емкости) к локальным участкам, расположенным за огороженной территорией объекта, где наблюдаются несколько очагов вторичного радиоактивного загрязнения с превышением активности 1 кБк/кг. К 2017 г. отмечается уменьшение удельной активности ^{90}Sr в почве локальных участков 6а и 10е до 6-7 раз (рис. 3). В почве участков 3, 3b, 4, 10с, 10d, 10l в период с 2010 г. по 2017 г. удельная активность радионуклида уменьшается (рис. 3). Вынос активности радионуклида из 0-5 см слоя почвы на участках 3, 4, 6а, 10е описывается экспоненциальной моделью $A=A_0e^{-B*(t-2010)}$, $p<0.05$ (Рисунок 3). Параметр В равен 0.333 ± 0.029 ; 0.231 ± 0.044 ; 0.347 ± 0.087 ; 0.191 ± 0.068 , для участков 3, 4, 6а, 10е, соответственно.

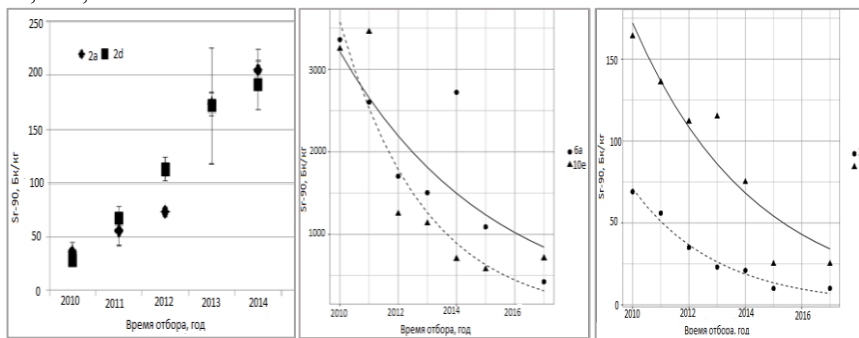


Рисунок 3 – Динамика изменения удельной активности ^{90}Sr в 0-5 сантиметровом слое почвы

Однако вторичное загрязнение участка 7а со временем нарастает, достигая к 2017 г. 4943 ± 35 Бк/кг. В почве локальных участков 3а, 4а, 4б, 4с, 6, 6б, 10, также отмечается увеличение активности радионуклида со временем, при этом обнаруживаются участки с высоким содержанием ^{90}Sr (более 1 кБк/кг) – 6д, 6с, 7б, 10б, 11.

Таким образом, в рамках оценки экологического риска для территории расположения хранилища РАО в качестве фактора экологической опасности необходимо рассматривать радионуклид ^{90}Sr и содержание химических веществ в почве, а реципиентом воздействия – наземную экосистему.

Глава 5. Выявление референтных видов и показателей при радиоактивном загрязнении ^{90}Sr наземной экосистемы

В диссертационной работе предлагается ввести термин «референтный показатель», который не исключает анализ в призме критических нагрузок как релевантных эффектов, предложенных МКРЗ (ICPR, 2008), так и других эффектов. Референтный показатель – это радиационно-индуцированное изменение морфологического, физиологического, биохимического или другого показателя биоты на уровне вида, популяции или экосистемы в целом, которое может быть описано достоверной моделью, имеющей пороговое значение. В свою очередь пороговое значение может выступать в качестве критической нагрузки при оценке экологического риска.

5.1 Ферментативная активность микробоценозов

Радиоактивное загрязнение почвы может нарушать её гомеостаз и приводить к деградации (Алексахин, Р.М., 2009; Methods in Soil Biology, 1995), что вызывает изменение функциональной и биохимической активности почвенных микроорганизмов. Для определения чувствительности показателя ферментативной активности почв к воздействию излучения ^{90}Sr в период с 2011 г. по 2014 г. были проведены натурные исследования с учётом ежегодного расширения ареала экспериментальной площадки. Установлено, что активность инвертазы, уреазы и дегидрогеназы устойчива к радиоактивному загрязнению почвы ^{90}Sr в диапазоне удельной активности радионуклида от 1.83 ± 0.02 до 3772 ± 8 Бк/кг. Выявлено, что каталазная активность является чувствительным показателем к радиоактивному загрязнению почвы ^{90}Sr и может использоваться в качестве референтного показателя при оценке экологического риска для почвенного биоценоза и наземной экосистемы в целом. (Lavrentyeva G.V. et al., 2017; Лаврентьева Г.В. и др., 2018; Lavrentyeva G.V., 2019). Следует отметить, что роль каталазы заключается в разрушении ядовитой для клеток перекиси водорода на воду и молекулярный кислород в результате реакции разложения (Хазиев, 2005).

5.2 Морфологические показатели наземных моллюсков янтарка *Succinea putris* и улитка кустарниковая *F. fruticum* M.

В диссертационной работе проведены исследования, направленные на изучение радиационно-индуцированных изменений морфологических показателей моллюсков янтарка *Succinea putris* и улитка кустарниковая *F.*

fruticum М., которые распространены на изучаемой территории. Моллюски давно признаны удобным инструментом биоиндикации при загрязнении окружающей среды благодаря высоким коэффициентам накопления тяжелых металлов и радионуклидов, широкой распространенности, простоте идентификации, короткому жизненному циклу и малой подвижности. К изучаемым показателям были отнесены масса всего организма, масса раковин, высота и ширина раковин. Изучение и отбор претендентов на референтные виды проводилось в натуральных экспериментах в период с 2010 по 2014 гг.

Изученные морфологические показатели моллюска *Succinea putris* являются устойчивыми к радиоактивному загрязнению наземной экосистемы ^{90}Sr , поэтому моллюск *Succinea putris* не будет рассматриваться в качестве референтного вида для оценки экологического риска.

Изучение морфологических показателей кустарниковой улитки *F. fruticum* позволило выявить следующее. Наблюдается значимое отличие от контроля по t-критерию Стьюдента высоты раковины, массы раковины и всего организма. Относительно показателя ширины раковины моллюска можно заключить, что значимое отличие от контрольного значения 16.82 ± 0.01 мм установлено только для одного локального участка из всех исследуемых.

На основании выявленных в данном исследовании значимых отличий морфологических показателей у *F. fruticum* М. относительно контроля следует отметить, что данный вид моллюска может выступать в качестве референтного вида при оценке радиационного экологического риска для изучаемой территории. При этом в качестве референтных показателей могут быть рассмотрены морфологические параметры моллюска *F. fruticum* М. Полученные экспериментальные результаты представлены в публикации (Лаврентьева Г.В. и др., 2018).

Глава 6. Определение и анализ критических нагрузок на основе построения зависимостей «доза - эффект» в градиенте нагрузки

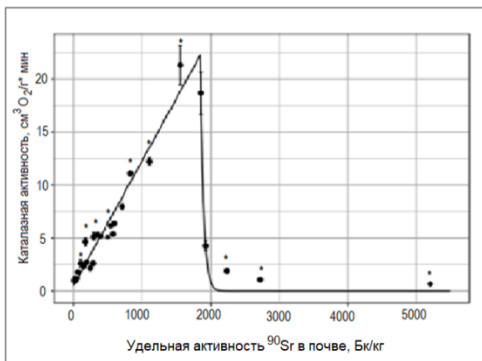
В соответствии с предложенным определением референтного показателя в разработанном методе оценки экологического радиационного риска в качестве критической нагрузки может выступать пороговое значение модели, описывающей изменение референтного показателя.

6.1 Определение критической нагрузки при анализе зависимости «удельная активность ^{90}Sr в почве – изменение каталазной активности почв»

Установленное изменение каталазной активности при увеличении содержания ^{90}Sr в почве, при расширении ареала исследования, а, следовательно, и диапазона удельной активности радионуклида в почве явилось причиной дополнительного изучения отклика каталазы на радиоактивное загрязнение наземной экосистемы. Исследование проводилось в 2015 г. Анализ зависимости изменения каталазной активности почв от концентрации химических веществ в почве не выявил закономерного

изменения. При этом при одинаковых концентрациях химических элементов и значительно отличающихся удельных активностях ^{90}Sr в почве наблюдается различие каталазной активности, которое составляет от 1.5 до 9 раз. На основании вышесказанного можно утверждать о радиационно-индуцированном изменении каталазной активности.

Диапазон изменения удельной активности ^{90}Sr в почве от 1.83 ± 0.02 до 5203 ± 89 Бк/кг. При удельной активности ^{90}Sr в почве от 1.83 ± 0.02 до 1858 ± 22 Бк/кг отмечается значительное стимулирование каталазной активности, возможно, обусловленное развитием устойчивых форм микроорганизмов. Увеличение активности каталазы от 0.9 ± 0.3 до 21.3 ± 5.9 $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г} \cdot \text{мин}$ носит линейный характер и описывается уравнением вида: $y = 0.482x + 0.0118$ ($r = 0.953$; $p < 2.2 \cdot 10^{-16}$).



* значимые отличия от контроля, $p < 0.05$, t -критерий Стьюдента

Рисунок 4 – Изменение каталазной

Дальнейшее увеличение удельной активности ^{90}Sr в почве приводит к резкому угнетению каталазной активности до значений 0.6 ± 0.3 $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г} \cdot \text{мин}$ при контрольном значении 0.9 ± 0.3 $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г} \cdot \text{мин}$, что связано с усилением генотоксического действия на клетки микроорганизмов излучения ^{90}Sr . Изменение активности каталазы может быть описано достоверной моделью с пороговым значением 21.3 ± 5.9 $\text{см}^3\text{O}_2/\text{г} \cdot \text{мин}$ (рис. 4) при удельной активности ^{90}Sr в почве 1858 ± 22 Бк/кг, которая является критической нагрузкой для оценки риска (Lavrentyeva G.V. et al., 2017).

6.2 Определение критической нагрузки при анализе коэффициентов накопления в системе «почва – крапива – наземный моллюск»

В рамках данного исследования не удалось подобрать достоверной модели для описания изменения КН ^{90}Sr крапивой двудомной в зависимости от удельной активности радионуклида в почве. Анализ КН ^{90}Sr раковинами моллюсков позволяет выявить изменение показателя от 24.6 ± 13.1 до 0.33 ± 0.04 в диапазоне изменения удельной активности ^{90}Sr в крапиве от 22.3 ± 13.4 до 10596 ± 195 Бк/кг. Снижение КН описывается достоверной степенной зависимостью вида $y = 1/(4.7E-4 \cdot A)^{0.7}$, где A – удельная активность радионуклида в крапиве, Бк/кг (рис. 5) (Шошина Р.Р., Лаврентьева Г.В. и др., 2014; Лаврентьева Г.В. и др., 2018; Lavrentyeva G.V., 2019). Следует отметить, что уменьшение КН радионуклидов, в том числе и стронция, пресноводными моллюсками при возрастании аккумуляции радионуклидов

моллюсками в условиях увеличения их концентрации в окружающей среде ранее было выявлено в работе (Телитченко М.М., 1969).

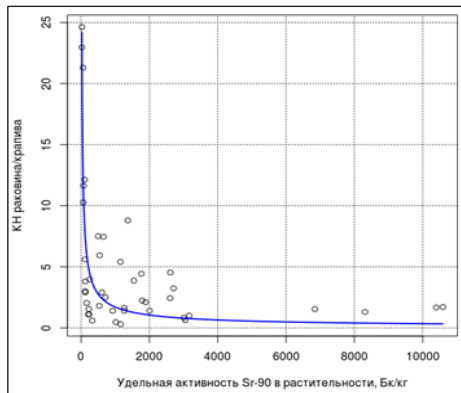


Рисунок 5 – Изменение коэффициента накопления ^{90}Sr раковиной моллюска

Таким образом, КН ^{90}Sr раковинами моллюсков *F. fruticum* М. в зависимости от удельной активности радионуклида в крапиве может рассматриваться в качестве референтного показателя для референтного вида. Критической нагрузкой при анализе вышеуказанного показателя накопления является удельная активность радионуклида в крапиве 2138 ± 52 Бк/кг, которому соответствует критическая величина КН – 1.

6.3 Оценка мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска *F. fruticum* М.

Для обоснования выбора наиболее адекватного метода оценки дозовой нагрузки на наземного моллюска с точки зрения учёта всех источников облучения, геометрии тела и особенностей накопления ^{90}Sr животными проведены расчеты мощности доз облучения посредством интегрированного пакета ERICA Tool, классического расчетного метода формулами Р. Левинджера, Л.Д. Маринелли и разработанного нами алгоритма расчета методом Монте-Карло. Входными параметрами для расчета мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска служат удельные активности ^{90}Sr в компонентах экосистемы: 1.83 ± 0.02 – 5203 ± 785 Бк/кг; 22.3 ± 13.4 – 10596 ± 195 Бк/кг, 76 ± 11 – 17640 ± 2646 Бк/кг для почвы, растительности и раковин наземных моллюсков, соответственно.

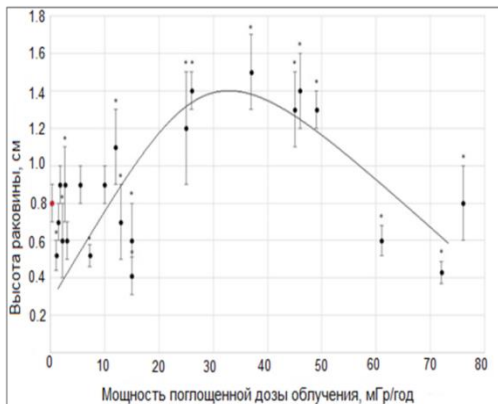
Следует отметить, что расчетный метод формулами Р. Левинджера и Л.Д. Маринелли учитывает все возможные сценарии облучения животного, однако даёт завышенные оценки мощности дозы из-за игнорирования массы малого биологического объекта. В свою очередь расчет дозовых нагрузок посредством интегрированного пакета ERICA Tool приводит к занижению мощности дозы облучения наземного моллюска, т.к. невозможен учет сценария самооблучения моллюска от раковины (как источника внешнего облучения), который дает основной вклад в формирование дозы, и сценария облучения животного от крапивы.

При расчете мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска методом Монте-Карло учитывается, что основной вклад в облучение наземного моллюска на изучаемой территории вносит ^{90}Sr ,

поэтому решение дозиметрической задачи сводится к оценке переноса излучений β -источника ^{90}Sr и β -, γ - источника его дочернего радионуклида ^{90}Y . Разработаны материальная и геометрическая модели изучаемого биологического объекта. Расчёты, выполненные посредством программы MCNP5 с применением различных оценок, позволяют учесть по 10^9 историй облучения для каждого допущения. При расчётах практически для всех результатов получена дисперсия менее 0.01 %, в исключительных случаях – менее 0.3 %. При оценке мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска учитывались все возможные сценарии облучения: сценарий самооблучения, сценарий обитания моллюска на поверхности почвы, сценарий облучения моллюска в состоянии анабиоза, сценарий облучения моллюска от крапивы при обитании на растительности в вегетационный период. Мощность дозы облучения моллюска, рассчитанная с учетом всех сценариев и допущений, варьирует в диапазоне значений от 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год (Лаврентьева Г.В. и др., 2017; Лаврентьева Г.В. и др., 2018; Lavrentyeva G.V. et al., 2019).

6.4 Определение критической нагрузки при анализе зависимости «мощность дозы облучения моллюска *F. fruticum* М. – изменение морфологических показателей моллюска»

При расширении ареала исследования и, следовательно, диапазона мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска изучено изменение морфологических показателей животного, которые могут являться референтными показателями (установлено в разделе 5.2). К ним относятся высота раковины, масса раковины моллюска и масса всего организма. Учитывались экспериментальные данные, полученные на локальных



*- значимое отличие от контроля, $p < 0.05$, t – критерий Стьюдента

Рисунок 6 – Изменение высоты раковины

участках пробоотбора, где плотность популяции моллюска составляла в среднем 24 экз./м^2 .

Анализ изменения массы всего организма от увеличения мощности поглощенной дозы облучения моллюска не выявил достоверной зависимости. Однако наблюдается достоверное линейное снижение массы раковин от 4.1 ± 0.4 г до 0.38 ± 0.02 г при увеличении дозовой нагрузки на организм от 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год, которое описывается уравнением $y = -0.02x + 2.2$ ($r = 0.923$, $p < 0.05$).

Следует отметить, что масса раковины моллюска достоверно изменяется в

диапазоне мощности поглощенной дозы облучения 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год и может рассматриваться в качестве референтного показателя при обосновании кустарниковой улитки как претендента на референтный вид (Лаврентьева Г.В. и др., 2017). Однако выявленная линейная зависимость не имеет порогового значения, которое может служить значением критической нагрузки при оценке экологического риска.

Установлено достоверное изменение высоты раковины моллюска при увеличении мощности поглощенной дозы облучения ($p < 0.05$), которое описывается уравнением вида $y = 0.5 + 0.06xe^{(-0.04x)}$ (рис. 6) (Лаврентьева Г.В. и др., 2017). Мощность поглощенной дозы облучения моллюска в диапазоне от контрольного значения 0.32 ± 0.07 мГр/год до 37 ± 6 мГр/год приводит к увеличению высоты раковины от 0.8 ± 0.1 до 1.5 ± 0.3 см. При повышении мощности дозы до 76 ± 9 мГр/год наблюдается угнетение ростового параметра, что отражается на снижении высоты раковины до 0.41 ± 0.06 см (Лаврентьева Г.В. и др., 2017, 2018). Следует отметить, что на изменение морфологических показателей наземных моллюсков могут оказывать влияние климатические факторы (температура среды обитания, влажность), возраст моллюсков, плотность популяции, загрязнение места их обитания. Условия проведенного натурального эксперимента исключает вышеуказанные факторы, кроме радиоактивного загрязнения территории (Лаврентьева Г.В. и др., 2017).

Таким образом, мощность поглощенной дозы облучения 37 ± 6 мГр/год (соответствует высоте раковины 1.5 ± 0.3 см), превышение которой приводит к уменьшению высоты раковины, может учитываться как критическая нагрузка при оценке радиационного экологического риска.

6.5 Определение критической нагрузки при анализе зависимости «мощность дозы облучения моллюска *F. fruticum* М. – изменение уровня белков-МТ в мягких телах моллюска»

Для выявления референтных показателей осуществлялся анализ изменения уровня белков-МТ. Индукция белков-МТ является реакцией на воздействие различных стрессовых факторов (Hogstand С., Наух С., 1991; Данилин И.А., 2006; Пыхтеев Д.М. и др., 2013; Котеров А.Н. и др., 1995). В рамках натурального эксперимента выявлено достоверное изменение содержания белков-МТ от 12.4 ± 1.4 до 57 ± 9 мкг/г в мягких тканях моллюсков в диапазоне мощности поглощенной дозы облучения от 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год, которое описывается достоверным уравнением кусочно-линейной модели (Рис. 7): $y = a$, если $x \leq x_s$; $y = a + b \cdot (x - x_s)$, если $x > x_s$.

Оценка значений параметров и их доверительные интервалы:

$$a = 19.3 \pm 1.4, b = 1.12 \pm 0.19, x_s = 42.3 \pm 4.0$$

Т.е. имеем уравнение следующего вида:

$$y = 19.3 \text{ мкг/г, если } x \leq 42.3 \text{ мГр/год;}$$

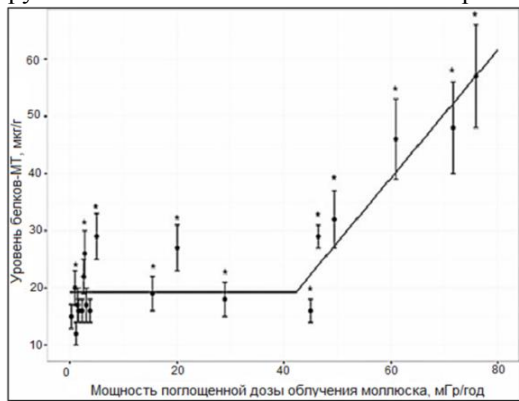
$$y = 19.3 + 1.12 \cdot (x - 42.3) \text{ мкг/г, если } x > 42.3 \text{ мГр/год,}$$

где 19.3 – постоянное значение до порога, 42.3 – пороговое значение мощности поглощенной дозы, 1.12 – коэффициент пропорциональности в области линейного отклика.

Мощность дозы облучения наземного моллюска в диапазоне от 0.32 ± 0.07 до 42.3 ± 5.8 мГр/год не влияет на синтез белков-МТ, что отражается в наличии дозозависимого участка (Лаврентьева Г.В. и др., 2017).

Данное явление может быть обусловлено процессом детоксикации образующихся свободных радикалов на фоне стабильной функции системы антиоксидантной защиты. При повышении дозовой нагрузки от 42.3 мГр/год до 76 ± 9 мГр/год в мягких тканях наземного моллюска возможно происходит процесс активизации синтеза белков-МТ, что проявляется в увеличении их концентрации на фоне угнетения защитных свойств других компонент антиоксидантной защиты.

Следует отметить, что имеются научные сведения об изменении уровня белков-МТ в мягких тканях моллюсков при малых дозах облучения. Авторы работы (Gnatyshyna L. et al., 2012) утверждают, что при хроническом облучении моллюска *Lymnaea stagnalis*, а также при облучении в малых дозах (2 мГр) белки-МТ мягких тканей моллюска могут выступать индикатором радиационного воздействия. При этом в исследовании установлено уменьшение удельного содержания белков-МТ в облученной группе моллюсков по отношению к контрольной.



*- значимое отличие от контроля, $p < 0.05$, t -критерий Стьюдента

Рисунок 7 – Изменение уровня белков-МТ в мягких телах наземных моллюсков

фактора. При этом при мощности поглощенной дозы облучения 0.1 Гр отмечается уменьшение удельного содержания белков-МТ до значения 9.7 ± 3.1 мкг/г относительно контрольного значения (13.7 ± 4.9 мкг/г). Увеличение мощности дозы облучения от 0.2 до 0.7 Гр приводит к увеличению уровня белков-МТ до удельной активности 17.7 ± 2.4 мкг/г. При

Кроме того для изучения воздействия малых доз радиации на белки-МТ моллюска *F.fruticum* М. нами был проведен лабораторный эксперимент, который предполагал γ -облучение животного в диапазоне доз 0.1–1 Гр с шагом 0.1 Гр. Анализ результатов лабораторного эксперимента позволяет отметить чувствительность показателя уровень белков-МТ в мягких телах наземных моллюсков при воздействии радиационного

дальнейшем увеличении дозовой нагрузки на моллюска до 1 Гр отмечается уменьшение уровня белков-МТ до 4.4 ± 0.8 мкг/г. При наблюдаемом уменьшении уровня белков МТ, вероятно, клетки моллюска израсходовали имевшийся запас МТ на связывание образовавшихся при облучении свободных радикалов.

Ввиду того, что синтез белков-МТ может регулироваться поступлением тяжелых металлов в организм животных, при интерпретации представленных экспериментальных данных необходимо учитывать уровень загрязнения ими окружающей среды. Анализ содержания химических веществ в почве изучаемой территории позволяет выявить однородность загрязнения локальных участков по отношению друг к другу и к контрольному участку. Кроме того, не отмечается закономерного изменения уровня белков-МТ в мягких тканях моллюска в зависимости от суммарного показателя загрязнения почвы химическими веществами.

Таким образом, уровень белков-МТ в мягких тканях наземного моллюска может рассматриваться в качестве референтного показателя для оценки радиационного экологического риска. При этом критической нагрузкой является пороговое значение зависимости «доза – эффект» – 42.3 ± 5.8 мГр/год. Результаты исследований, направленных на изучение уровня белков-МТ в качестве референтного вида представлены в публикациях (Лаврентьева Г.В. и др., 2018; Лаврентьева Г.В. и др., 2017; Шошина Р.Р. и др. 2017; Lavrentyeva G. et al., 2017; Шошина Р.Р. и др., 2015).

В разделе 6.6 приведено обоснование референтного организма (наземного моллюска *F.fruticum* М.) для развития экцентрической системы радиационной защиты биоты, основанное на теоретических исследованиях и экспериментальных данных, полученных в рамках натурного эксперимента. Следует отметить, что разработанная схема проведения дозиметрического расчета содержит радионуклид-специфичные коэффициенты пересчета для ^{90}Sr , учитывающие все возможные источники и сценарии облучения моллюска при определенном содержании ^{90}Sr в почве, растительности, организме животного. При нормировании радионуклид специфичных дозовых коэффициентов преобразования по $^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$ на единичную активность получены следующие значения: $1.3\text{E}-11$ мкГр/час/1Бк/кг удельной активности в почве; $1.4\text{E}-11$ мкГр/час/1 Бк/кг удельной активности в крапиве; $4.7\text{E}-10$ мкГр/час/1Бк/кг удельной активности в раковине (раковина рассматривается как источник внешнего облучения мягкого тела моллюска).

Несмотря на устоявшееся мнение о радиорезистентности представителей почвенной мезофауны, к которым относятся и наземные моллюски, на территории ВУРСа также были обнаружены радиационные эффекты у почвенных беспозвоночных при хроническом облучении ^{90}Sr в низкодозовом диапазоне (Крупные радиационные аварии, 2001).

Глава 7. Оценка радиационного экологического риска по критическим нагрузкам

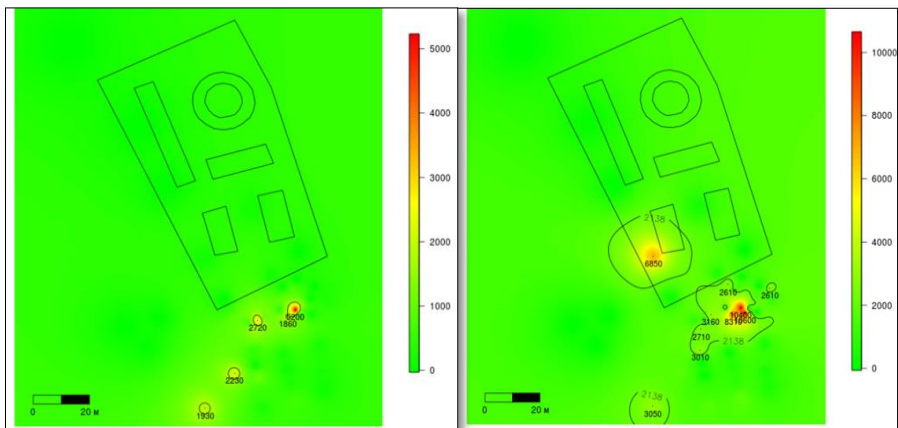
7.1 Оценка экосистемного риска, анализ функций риска

Анализ картирования и расчета превышения критических нагрузок показывает, что для исследуемой территории площадь, характеризующаяся превышением критической нагрузки для каталазной активности, составляет 0.21 %, что не превышает приемлемую величину 5% (рис. 8). При этом экосистемный экологический риск характеризуется как приемлемый (Лаврентьева Г.В. и др.). Анализ соответствующих результатов для показателя КН ^{90}Sr раковинами моллюска позволяет выявить превышение приемлемой величины (5%), т.к. площадь с превышением критической нагрузки составляет 5.75 % (рис. 9). В данном случае экологический радиационный риск воздействия загрязнения на наземную экосистему характеризуется как превышающий приемлемый (Лаврентьева Г.В. и др., 2018, Lavrentyeva G.V., 2019). Оценка радиационного экологического риска для наземной экосистемы с учетом референтного показателя высота раковины моллюска позволяет выявить приемлемость риска (Лаврентьева Г.В. и др., 2018). При этом площадь исследуемой территории, характеризующаяся превышением соответствующей критической нагрузки, составляет 0.92 % (рис. 10). Приемлемым также является радиационный экологический риск при его оценке с учетом превышения критической нагрузки по уровню белков-МТ (рис. 11), т.к. доля площади с превышением критической нагрузки составляет 0.53% (Лаврентьева Г.В. и др., 2018).

На основании превышения величины критических нагрузок были построены функции риска – функции распределения площади по содержанию ^{90}Sr в почве/крапиве или мощности поглощенной дозы облучения моллюска.

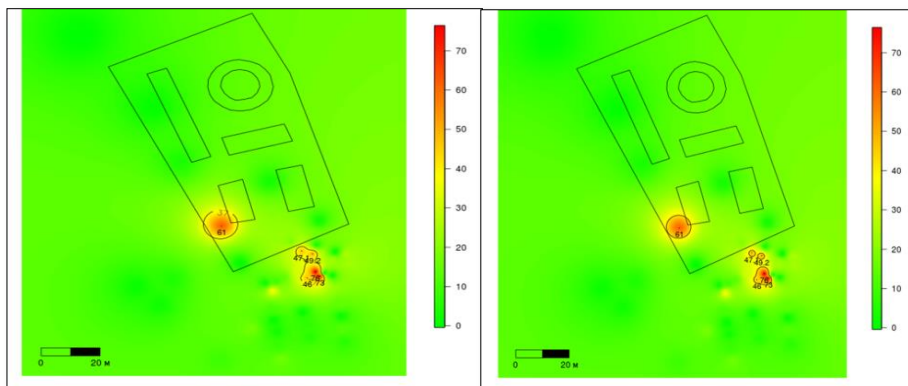
Для графического представления функций риска приняты следующие предположения. При значениях удельной активности ^{90}Sr в почве/растительности или мощности поглощенной дозы, меньших соответствующих критических нагрузок, вероятность превышения равна 0. При превышении уровня критической нагрузки вероятность превышения принимается за 1. Красной линией на графиках, отображающих функцию риска, обозначено 95% площади исследуемой территории, пунктиром обозначено значение критической нагрузки (рис. 12 – 15).

Построенные функции риска позволили получить вероятность (риск) превышения критических нагрузок, т.е. вероятность развития негативных изменений в исследуемой наземной экосистеме. При этом отмечается превышение критической нагрузки на более, чем 95% исследуемой территории для показателя КН. В свою очередь не отмечается превышение критических нагрузок относительно показателя 95% площади по показателям каталазной активности, высоты раковины наземного моллюска и уровня белков-МТ.



* тоновая заливка отражает изменение удельной активности ^{90}Sr в почве, Бк/кг
 Рисунок 8 – Карта ГИС с превышением критических нагрузок для референтного показателя – каталазная активность почв

* тоновая заливка отражает изменение удельной активности ^{90}Sr в крапиве, Бк/кг
 Рисунок 9– Карта ГИС с превышением критических нагрузок для референтного показателя – КН ^{90}Sr раковинами моллюсков



*тоновая заливка отражает изменение мощности поглощенной дозы облучения моллюска, мГр/год

Рисунок 10 – Карта ГИС с превышением критических нагрузок для референтного показателя – высота раковины моллюска

Рисунок 11 – Карта ГИС с превышением критических нагрузок для референтного показателя – уровень белков-МТ

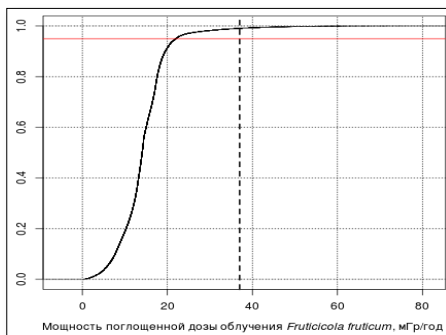


Рисунок 12 – Функция риска по критической нагрузке для референтного показателя – высота раковины моллюска

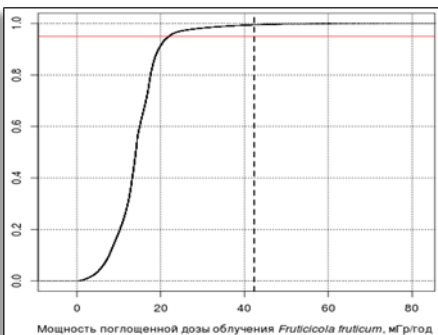


Рисунок 13 – Функция риска по критической нагрузке для референтного показателя – уровень белков-МТ

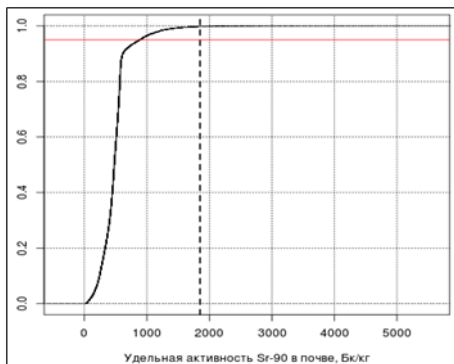


Рисунок 14 – Функция риска по критической нагрузке для референтного показателя – каталазная активность

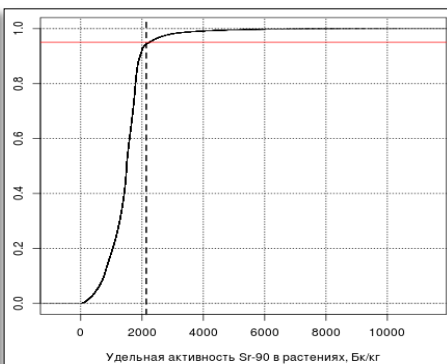


Рисунок 15 – Функция риска по критической нагрузке для референтного показателя – КН ^{90}Sr

В разделе 7.2 приведен анализ неопределенностей в оценке радиационного экологического риска. Неопределенности возникают на каждом этапе метода оценки радиационного экосистемного риска, включая выбор самой экосистемы, площади исследованной территории и границ экспериментальной площадки, выбор факторов экологической опасности, выбор референтных видов и показателей, определение критической нагрузки с учетом допустимых уровней радиационного воздействия на биоту и интерпретацию риска с популяционного уровня на экосистемный.

Глава 8. Сравнительный анализ радиационного воздействия на биоту и население при аварийных ситуациях

В настоящее время требуется гармонизация подходов обеспечения радиационной безопасности окружающей среды, учитывая возможное неэквидозное облучение человека и биоты (Алексахин Р.М., 2006). В диссертационной работе для сравнительной оценки воздействия радиоактивно загрязненной территории в зоне влияния хранилища РАО применен детерминистский метод, основанный на расчете индексов радиационного воздействия на биоту и человека.

8.1. Оценка дозовых нагрузок и радиационного риска для населения при возможных авариях

Оценка радиационного риска для населения при возможных авариях проводилась на основании методики МАГАТЭ (IAEA-TECDOC-1380, 2003). Методика направлена на расчет дозовых нагрузок и радиационных рисков от возможных сценариев поступления радиоактивных веществ в природную среду и не противоречит предлагаемой российскими учеными методике (Р 52.18.787-2013, 2013). Для расчёта были выбраны два наиболее вероятных сценария разрушения защитных барьеров и утечки радионуклидов в окружающую среду (IAEA-TECDOC-1380, 2003): сценарий «утечка жидкости» и сценарий «ресуспензия пыли». Установлено, что значение суммарного радиационного риска для здоровья населения при реализации рассмотренных сценариев выше уровня пренебрежимого риска для населения, составляющего значение 10^{-6} (СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009) (табл. 1).

Таблица 1 – Риски для населения от реализации сценариев

Сценарий	Риск от облучения ^{137}Cs , год ⁻¹	Риск от облучения ^{90}Sr , год ⁻¹	Суммарный риск от облучения радионуклидами, год ⁻¹
«Утечка жидкости»	2.7E-08	2.3E-05	2.3E-05
«Ресуспензия пыли»	3.0E-03	1.3E-03	4.3E-03

Для сценария «утечка жидкости», который был реализован при разгерметизации емкости хранилища РАО в 1998 г, радиационный риск можно отнести к категории «требуется оптимизация риска» в соответствии с (Р 52.18.787 – 2013, 2013).

8.2. Сравнительная оценка дозовых нагрузок на человека и биоту при авариях

Для оценки радиационного воздействия на биоту и человека, обитающих на одной территории, т.е. в идентичных радиоэкологических условиях в ряде исследованиях (Спиридонов С.И. и др., 2007; Фесенко С.В. и др., 2004; Баранов С.А. и др., 2009), выполненных в районе аварии на Чернобыльской АЭС, применяют индекс радиационного воздействия $RIF_{h,b}$, который может быть рассчитан следующим образом (3):

$$RIF_{h,b} = \frac{D_{h,b}}{CDV_{h,b}}, \quad (3)$$

где D_h – доза облучения человека, Зв; D_b – доза облучения биологического объекта, Гр; CDV_h – критическая дозовая нагрузка для человека, Зв; CDV_b – критическая дозовая нагрузка для биоты, Гр.

Если $RIF_{h,b} < 1$, то человека/биоту можно считать защищенными от воздействия ионизирующих излучений, если, $RIF_{h,b} > 1$ – не защищенными. Соответственно, если $RIF_h > RIF_b$, то воздействие радиоэкологических условий на биоту меньше, чем на человека.

При расчете индекса для человека за критическую дозовую нагрузку (CDV_h) принимался передел дозы для населения 1 мЗв/год, регламентируемый НРБ99/09 (СанПиН 2.6.1.2523-09. НРБ-99/2009). В качестве дозы облучения (D_h) применялись рассчитанные дозы облучения для населения, проживающего в зоне влияния хранилища РАО, с учетом выше рассмотренных сценариев эволюции объекта (табл. 2).

Таблица 2 – Индексы радиационного воздействия для человека

Сценарий	Доза облучения населения, Зв/год	Индексы радиационного воздействия (RIF_h)
«Утечка жидкости»	4.0E-04	0.4
«Ресуспензия пыли»	0.075	75

Сценарий «утечка жидкости», который принят в рамках данной работы как основной и был реализован на хранилище РАО, создает радиоэкологическую обстановку на изучаемой территории, при которой человек является защищенным от радиационного воздействия.

Для расчета индексов радиационного воздействия для наземного моллюска были использованы разные критические дозовые нагрузки (табл. 3): установленные в диссертационной работе критические нагрузки для наземного моллюска, а именно 37 ± 6 мГр/год при изучении изменения высоты раковины моллюска и 42.3 ± 5.8 мГр/год при изучении уровня белков-МТ в мягких тканях, а также дозовый стандарт 10 мкГр/час (87.6 мГр/год), принятый в рамках проекта ERICA. В качестве дозы облучения биологического объекта D_b принята максимальная мощность дозы облучения наземного моллюска, обитающего на изучаемой территории – 76 ± 9 мГр/год.

Таблица 3 – Индексы радиационного воздействия для наземного моллюска

Критическая дозовая нагрузка (CDV_b), мГр/год	Индекс радиационного воздействия (RIF_b)
37 ± 6	2.1
42.3 ± 5.8	1.8
87.6	0.9

На основании проведенных расчетов можно предположить, что наземный моллюск с учетом полученных в диссертационной работе критических

нагрузок в сложившихся радиоэкологических условиях не является защищенным в зоне влияния хранилища РАО, т.к. индексы радиационного воздействия превышают 1 в среднем в 2 раза (табл. 3). Однако при учете предела мощности дозы, предложенной проектом ERICA, изучаемый биологический объект является защищенным, т.к. $RIF_b < 1$.

Анализ воздействия радиоактивно загрязненной территории на человека и биоту посредством сравнения RIF_n (для сценария «утечка жидкости») и RIF_b (табл. 2, 3) позволил выявить, что наземный моллюск *F.fruticum* подвергается наибольшему радиационному воздействию, чем человек. При этом индекс $RIF_b > RIF_n$ при учете всех критических дозовых нагрузок: как полученных в диссертационной работе, так и рекомендуемых на международном уровне.

Следует отметить, что неэквидозное облучение биоты и человека впервые было установлено в регионе аварии на Южном Урале и подтверждено в регионе аварии на Чернобыльской АЭС, где превышение доз облучения представителей флоры и фауны превышало дозы облучения для человека в 30 – 120 раз (Алексахин Р.М., 2006).

ВЫВОДЫ

1. Разработанный метод оценки радиационного экологического риска по критическим нагрузкам основан на экспериментальном обосновании реципиента воздействия, референтных видов и показателей; обосновании дозиметрического метода расчета мощности поглощенной дозы облучения референтного вида; установлении зависимостей «доза-эффект» для референтных показателей; определении критических нагрузок как предельно допустимых уровней воздействия; количественной оценки радиационного экологического риска для наземной экосистемы. Эффективность метода продемонстрирована при оценке экологического риска для территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению, с учетом комплекса референтных показателей.

2. Изменение каталазной активности почв является чувствительным показателем при радиоактивном загрязнении почв ^{90}Sr в диапазоне от 1.83 ± 0.02 до 5203 ± 89 Бк/кг и описывается достоверной моделью с пороговым значением, соответствующим 1858 ± 22 Бк/кг почвы. До порогового значения удельной активности радионуклида в почве отмечается стимулирование каталазной активности, при превышении этой величины – угнетение.

3. Разработанная схема проведения дозиметрического расчета посредством метода Монте-Карло дает наиболее точную оценку мощности поглощенной дозы облучения наземного моллюска, тогда как расчетный метод формулами Р. Левинджера и Л.Д. Маринелли завышает оценку мощности дозы, а интегрированный пакет ERICA Tool – занижает искомый показатель на 1 – 2 порядка. Мощность поглощенной дозы облучения наземного моллюска варьирует в диапазоне от 0.32 ± 0.07 до 76 ± 9 мГр/год в

условиях хронического воздействия ^{90}Sr , при этом дозовая нагрузка на 95% формируется за счет самооблучения животного.

4. Экспериментальные зависимости радиационно-индуцированного изменения высоты раковины, уровня белков-МТ в мягких тканях наземного моллюска *F. fruticum* М. в диапазоне мощности поглощенной дозы от $0.32 \pm 0,07$ до 76 ± 9 мГр/год и зависимость изменения КН ^{90}Sr раковинами моллюска являются нелинейными и подтверждают «пороговость» действия радиации на биоту.

5. Радиационный экологический риск для наземной экосистемы, подвергшейся радиоактивному загрязнению, является приемлемым при учете критической нагрузки на каталазную активность почвы, высоту раковины и уровень белков-МТ в мягких телах наземного моллюска и неприемлемым с учетом критической нагрузки на референтный показатель – КН ^{90}Sr раковинами моллюска. Однако при анализе неприемлемости риска выявлено превышение допустимой величины 5% на 0.75% из возможных 95%, что приближает приемлемость риска с учетом неопределенности в его оценке.

6. Индексы радиационного воздействия для наземного моллюска выше соответствующих индексов для человека при учете как критических дозовых нагрузок, полученных при выявлении критических нагрузок для референтных показателей, так и рекомендованных на международном уровне. Популяция наземного моллюска *F. fruticum* М., обитающего в условиях хронического облучения ^{90}Sr , подвержена наибольшему радиационному воздействию, чем человек.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Лаврентьева, Г.В. Технология оценки экологического риска для малой реки / Г.В. Лаврентьева, Е.В. Рева, Б.И. Сынзыныс, О.А. Мирзеабасов, А.В. Рогуленко // Вестник РАЕН. – 2011. – №4. – С. 58 – 65.

2. Рева, Е.В. Оценка экологического риска с помощью анализа критических нагрузок на водные экосистемы / Е.В. Рева, О.А. Мирзеабасов, Г.В. Лаврентьева, А.В. Рогуленко, Б.И. Сынзыныс // Экология урбанизированных территорий. – 2011. – №1. – С. 78 – 85.

3. Момот, О.А. Природно-техногенные гидрохимические аномалии в подземных водах севера Калужской области / О.А. Момот, Г.В. Лаврентьева, Б.И. Сынзыныс, И.И. Силин // Проблемы региональной экологии. – 2012. – №1. – С. 46 – 52.

4. Бахвалов, А.В. Биогеохимическое поведение ^{90}Sr в наземных и водных экосистемах / А.В. Бахвалов, Г.В. Лаврентьева, Б.И. Сынзыныс // Биосфера. – 2012. – Т.4. – № 2. – С. 206 – 216.

5. Лаврентьева, Г.В. Сезонное изменение содержания ^{90}Sr в поверхностных и подземных водах района размещения хранилища

радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, И.И. Силин, Г.В. Козьмин, А.Н. Васильева, Б.И. Сынзыныс, Ю.М. Глушков, О.А. Момот // Вода: химия и экология. – 2012. – №12. – С. 26 – 31.

6. **Лаврентьева, Г.В.** Технология оценки экологического риска для сухопутной экосистемы в условиях хронического радиоактивного загрязнения / **Г.В. Лаврентьева**, А.В. Бахвалов, Б.И. Сынзыныс, Р.Р. Муллаярова // Проблемы анализа риска. – Т.9. – 2012. – №5. – С. 30 – 43.

7. Бахвалов, А.В. Оценка экологического риска на основе анализа критических нагрузок на экосистему регионального хранилища радиоактивных отходов / А.В. Бахвалов, Н.Н. Павлова, О.А. Мирзеабасов, М.М. Рассказова, **Г.В. Лаврентьева**, Б.И. Сынзыныс, Ю.М. Глушков // Радиация и риск. – 2012. – Т.21. – №4. – С. 43 – 52.

8. **Лаврентьева, Г.В.** Радиоэкологическая диагностика территории размещения регионального хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева** // Безопасность в техносфере. – 2013. – Т. 2. – №6. – С. 14 – 19.

9. Шошина Р.Р. Биогеохимические показатели миграции техногенного радионуклида ^{90}Sr на биотопе регионального хранилища радиоактивных отходов / Р.Р. Шошина, **Г.В. Лаврентьева**, И.В. Гешель, Б.И. Сынзыныс // Ядерная физика и инжиниринг. – 2014. – Т. 5. – № 3. – С. 223 – 228.

10. Сынзыныс, Б.И. Оценка радиационного экологического риска и её неопределённость для биоценоза регионального хранилища радиоактивных отходов / Б.И. Сынзыныс, О.А. Мирзеабасов, **Г.В. Лаврентьева**, Р.Р. Шошина, О.А. Момот // Радиация и риск. – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 43 – 54.

11. **Лаврентьева, Г.В.** Загрязнение геосистем радиоактивным стронцием в районе размещения регионального хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, И.И. Силин, Б.И. Сынзыныс // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. – 2015. – № 1. – С. 36–46.

12. Шошина, Р.Р. Применение концептуальной модели зональности хронического действия ионизирующей радиации при изучении поведения радиостронция в сухопутных экосистемах / Р.Р. Шошина, **Г.В. Лаврентьева**, Б.И. Сынзыныс // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 2. – С. 143 – 148.

13. **Лаврентьева, Г.В.** Радиационный риск для населения в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, М.Н. Каткова, Р.А. Сергулев, Л.В. Астахова // Безопасность в техносфере. – 2017. – №1. – С. 38 – 42.

14. **Лаврентьева, Г.В.** Мониторинг радиоактивного загрязнения почв в зоне воздействия регионального приповерхностного хранилища радиоактивных отходов в стадии вывода из эксплуатации / **Г.В. Лаврентьева**, О.А. Мирзеабасов, Б.И. Сынзыныс // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2017. – Т. 57. – №3. – С. 279 – 285.

15. **Лаврентьева, Г.В.** Оценка влияния ^{90}Sr на морфометрические показатели и уровень белков металлотиионеинов в мягких тканях сухопутных моллюсков *Bradybaena fruticum* на биотопе регионального хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, Р.Р. Шошина, О.А. Мирзеабасов, Б.И. Сынзыныс // Радиация и риск. – 2017. – Т. 26. – № 4. – С.110 – 114.

16. **Лаврентьева, Г.В.** Радиационный экологический риск для наземной экосистемы в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, О.А. Мирзеабасов, Б.И. Сынзыныс, И.В. Гешель // Радиация и риск. – 2018. – Т.27. – №4. – С. 65 – 75.

17. **Лаврентьева, Г.В.** Сравнительная оценка радиационного воздействия на биоту и население в идентичных радиозкологических условиях в зоне влияния хранилища радиоактивных отходов / **Г.В. Лаврентьева**, Б.И. Сынзыныс, О.А. Мирзеабасов // Радиация и риск. – 2019. – Т.28. – №4. – С. 129-136.

18. **Лаврентьева, Г.В.** Современные тенденции оценки радиационного экологического риска. Обзор / **Г.В. Лаврентьева**, Б.И. Сынзыныс // Радиация и риск. – 2020. – Т.29. – №2. – С. 128-138.

Публикации в международных изданиях:

19. **Lavrentyeva, G.V.** Ecological Risk Assessment for the Terrestrial Ecosystem under Chronic Radioactive Pollution / **G.V. Lavrentyeva**, О.А. Mirzeabasov, В.І. Synzynys // International Journal of Environmental Research. – 2014. –V. 8. – № 4. – P. 961 – 970. (Scopus, WoS)

20. **Lavrentyeva, G.V.** Characteristic of pollution with groundwater inflow ^{90}Sr natural waters and terrestrial ecosystems near a radioactive waste storage / **G.V. Lavrentyeva** // Journal of Environmental Radioactivity. – 2014. – V. 135. – P. 128 – 134. (Scopus, WoS)

21. **Lavrentyeva, G. V.** Geosystem Pollution by Radioactive Strontium near a Regional Radioactive Waste Repository / **G.V. Lavrentyeva**, І.І. Silin, В.І. Synzynys // Water Resources. – 2016. – V. 43. – № 7. – P. 948 – 956. (Scopus)

22. **Lavrentyeva, G.** Risk assessment for human health and terrestrial ecosystem under chronic radioactive pollution near regional radioactive waste storage / **G. Lavrentyeva**, М. Katkova, R. Shoshina, В. Synzynys // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – V. 784. – №1. Available from: <http://iopscience.iop.org/issue/1742-6596/784/1> (Scopus)

23. **Lavrentyeva, G.V.** Assessment of radiation environmental risk for the terrestrial ecosystem / **G.V. Lavrentyeva** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 487. – 2019. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/487/1/012010/pdf> (Scopus, WoS)

24. **Lavrentyeva, G.V.** Assessment of the radiation dose rate for a terrestrial mollusk during chronic Sr-90 irradiation / **G.V. Lavrentyeva**, А.Е. Oorzhak, R.R.

Shoshina, A.A. Oudalova, Yu.A. Kurachenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 487. – 2019. Available from: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/487/1/012012/pdf> (Scopus, WoS)

Авторские свидетельства:

25. Мирзеабасов О.А., **Лаврентьева Г.В.** Экориск: система анализа экологических данных // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014618623 от 26 августа 2014.

26. **Лаврентьева Г.В.**, Мирзеабасов О.А. САМИР: система анализа миграции радионуклидов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015614975 от 05 мая 2015.

Учебные пособия:

27. **Лаврентьева, Г.В.** Выбор референтных организмов, определение критических нагрузок и оценка экологического риска для территорий длительного хранения низкоактивных радиоактивных отходов: Методическое пособие по курсу «Техногенные системы и экологический риск» / **Г.В. Лаврентьева**, А.В. Бахвалов, О.А. Момот, О.А. Мирзеабасов, Б.И. Сынзыныс. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2013. – 32 с.

28. Сынзыныс, Б.И. Экологический риск: учебное пособие / Б.И. Сынзыныс, Л.П. Полякова, Т.В. Мельникова, С.В. Пяткова, О.А. Момот, **Г.В. Лаврентьева**, А.А. Удалова. – Обнинск: ИАТЭ НИЯУ МИФИ, 2015. – 67 с.

В других изданиях:

29. Силин, И.И. Оценка экологического риска для малой реки // И.И. Силин, **Г.В. Лаврентьева**, Е.В. Рева / Коллективная монография "Научные аспекты экологических проблем России" под редакцией Ю.А. Израэля и проф. Н.Г. Рыбальского, М: НИИ-Природа, 2012. – с. 281 – 284.

В сборниках тезисов российских и международных конференций и симпозиумов опубликовано 77 работ.