

ОТЗЫВ  
официального оппонента на диссертацию Лаврентьевой Галины Владимировны  
«Радиобиологическое обоснование метода оценки экологического риска по критическим  
нагрузкам», представленную в диссертационный совет Д 462.001.04 при Государственном  
научном центре Российской Федерации – Федеральном медицинском биофизическом  
центре им. А.И. Бурназяна» Федерального медико-биологического агентства России  
на соискание ученой степени доктора биологических наук  
по специальности 1.5.1 – Радиобиология

Актуальность работы. Радиационная безопасность человека и природных биосистем приоритетна для всего мирового сообщества. Диссертационная работа посвящена одной из актуальных проблем радиобиологии – разработке методов количественной оценки радиационных рисков по критическим нагрузкам на компоненты экосистем. Автор провела апробацию предлагаемого подхода на территории, загрязненной радионуклидами, создав новые алгоритмы обработки данных.

Тема диссертации соответствует паспорту заявленной научной специальности. Научная специальность 1.5.1 – Радиобиология включает разработку принципов и методов радиационного мониторинга, проблемы радиационной безопасности (п. 10), проблему радиочувствительности биологических объектов (п. 5), а также оценку отдаленных последствий действия излучений, включая хроническое действие радиации и эффекты малых доз (п. 11), изучение особенностей стохастических и не стохастических эффектов; анализ зависимостей: доза-эффект и время-эффект (п. 8), изучение последствий ядерных катастроф, синдрома Чернобыля, радиоэкологические исследования (п. 9). Работа выполнена строго в рамках избранной темы и соответствует поставленным целям и задачам.

Оценка общей методологии и методик исследований. Развиваемая в диссертации методология радиационного нормирования и расчета экологического риска содержит элементы новизны. Методы исследования, использованные автором, разнообразны и адекватны поставленным задачам. Часть из них разработана давно и хорошо апробирована. Другие методы представляют собой оригинальное развитие известных методологических подходов к оценке экологических рисков. Автором апробирована методика расчета доз более эффективная по сравнению с традиционными оценками и количественный анализ зависимостей «доза-эффект» при многофакторном воздействии.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, определяется применением современного оборудования и апробированных методик, большим объемом экспериментальных данных и их обработкой с помощью современных пакетов статистического анализа (программная среда R). Все выводы и положения, выносимые на защиту, обоснованы и достоверны.

Научная новизна полученных результатов

В работе получила развитие методология оценки радиационного риска на основе критических нагрузок в условиях радиоактивного загрязнения наземных экосистем. Впервые установлено достоверное изменение каталазной активности почв в диапазоне содержания <sup>90</sup>Sr в почвах от фоновых уровней до 5 кБк/кг.

На основании многолетних натурных исследований выполнено научное обоснование включения в список референтных видов для оценки радиационного воздействия на наземную экосистему моллюска *Fruiticicola fruiticum*. Впервые установлены коэффициенты дозового преобразования при облучении наземного моллюска *Fruiticicola fruiticum*.

16 АПР 2021  
КОЛ-ВО ЛИСТОВ: 7  
ФГБУ ГНЦ ФМБА России  
им. А.И. Бурназяна ФМБА России

бета-лучами  $^{90}\text{Sr} - ^{90}\text{Y}$  от растительности и от раковины (как внешнего источника облучения), а также от почвы с учетом обитания организма на почве и при заглублении в почву в состоянии анабиоза.

Впервые в натурных условиях установлено степенное изменение коэффициента накопления  $^{90}\text{Sr}$  раковинами моллюсков в зависимости от удельной активности радионуклида в крахиве двудомной (*Urtica dioica*).

Впервые проведено сравнение разных методов оценки поглощенных доз, разработан и апробирован алгоритм дозиметрического расчета для наземного моллюска с учетом всех источников облучения и для разных сценариев методом Монте-Карло.

Впервые установлены достоверные радиационно-индукционные эффекты в условиях хронического облучения  $^{90}\text{Sr}$  у моллюска *Fruticicola fruticum*, включая изменение морфологического показателя (высота раковины) и уровня белков-металлогионенов в диапазоне мощности поглощенных доз от 0,3 до 76 мГр/год.

Впервые проведено сравнение радиационного воздействия хранилища РАО на население и биоту на основании индексов радиационного воздействия при аварийных ситуациях. Доказано, что радионуклиды, поступившие в почву, оказывают большее радиационное воздействие на референтный вид (наземный моллюск), чем на человека.

#### Значимость выводов и рекомендаций для науки и практики

Полученные результаты вносят вклад в расширение существующих баз данных о накоплении  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах наземных экосистем, а также о радиобиологических эффектах. Детальный анализ моделей расчета мощности поглощенной дозы у моллюсков, вносит вклад в решение проблем дозиметрии. Методология оценки радиационного воздействия на организмы и сообщества с учетом других факторов среды способствует развитию экоцентрической концепции радиационной защиты. Предложенные автором научно обоснованные методы количественной оценки радиационных экосистемных рисков должны учитываться при разработке отечественных и международных нормативных документов в области радиационной безопасности. Автор имеет свидетельства о государственной регистрации программ 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»).

Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации. Апробация работы. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Материалы, вошедшие в диссертационную работу, опубликованы в престижных зарубежных (6 статей) и российских (18 статей) журналах из перечня изданий рекомендованных ВАК, а также были представлены на многочисленных международных и российских конференциях. Материалы исследования легли в основу двух учебно-методических пособий для студентов ВУЗов.

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

**Во введении** обоснована 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 для здоровья человека при воздействии радиационного и химического факторов (Обзор литературы).** Автор проанализировала достоинства и недостатки существующих методов оценки экологических рисков. Выявлены главные проблемы: недостаточный учет всей совокупности факторов воздействия на биоту и эффектов их взаимодействия, ограниченное число референтных видов, детерминистские, а не вероятностные подходы оценки доз и экологических рисков, недостаток информации о биологических эффектах в натурных условиях, отсутствие единых подходов к оценке экологических рисков. Большая часть проблемных вопросов находит свое решение в разработанном и представленном в диссертации методе количественной оценки радиационных экосистемных рисков по критическим нагрузкам, а также подкреплено материалами мониторингового исследования радиоактивно загрязненной экосистемы.

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

Предлагаемый метод является развитием уже существующих подходов к оценке экосистемного риска. Автор описывает и обосновывает пять основных этапов работы: идентификацию опасности; выявление референтных видов и показателей; определение критических нагрузок на основе анализа зависимостей «доза-эффект»; оценку экологического риска по критическим нагрузкам и анализ функций риска с учетом неопределенностей. При этом на всех этапах предлагаются новые подходы, позволяющие исключить ряд недостатков в уже существующих методах. Так, учитывается совокупность факторов воздействия на биоту, для оценки риска используются экспериментальные, а не расчетные данные, критические нагрузки рассчитываются на референтный (т.е. чувствительный к воздействию) показатель. Кроме того, методы оценки риска основываются на детерминистских и вероятностных подходах.

## **Глава 3. Объекты и методы исследования**

Дано краткое описание экспериментальных площадок, а также объектов исследования. Обсуждение характеристик почв, водных объектов, моллюсков и крапивы ограничено и не содержит необходимых сведений. Однако логика изложения материала в этой диссертации заключается в том, что многие характеристики объектов исследования приведены в последующих главах непосредственно при обсуждении результатов, что облегчает их понимание. Тем самым автор избегает повторов в характеристике объектов. В главе детально описаны методы отбора и пробоподготовки почв, воды, растений и моллюсков. Приведено описание хорошо апробированных методов определения искусственных и естественных радионуклидов, тяжелых металлов в природных средах, кроме того методов определения физико-химических свойств почв и их ферментной активности. Подробно описан метод определения содержание белков-металлотионинов в мягких тканях моллюсков. Оценку мониторинга поглощенных доз моллюсков проводили, сравнивая программное обеспечение ERICA Tool, расчетный метод на основании формул Р. Левинджа и Л.Д. Маринелли и метод Монте-Карло. Оценку радиационного риска для населения выполняли согласно методологии, предложенной МАГАТЭ.

## **Глава 4. Идентификация опасностей**

В этой главе даны количественные оценки радиоактивного и химического загрязнения поверхностных и подземных вод, а также почвы на территории расположения хранилища РАО. Сделано заключение, что загрязнение грунтовых и поверхностных вод  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  не является фактором экологической опасности для изучаемой территории. В почвах наземных экосистем концентрации Mn, Zn, Ni, Cu, Cr, Co, Cd, Pb, Fe, а также удельные активности  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{222}\text{Th}$  сопоставимы с фоновыми значениями. Автор не рассматривает  $^{137}\text{Cs}$  в качестве фактора экологической опасности для референтного вида, обосновывая это тем, что  $^{137}\text{Cs}$  находится преимущественно в фиксированной форме.

Обоснованием этого вывода являются также расчеты дозы от  $^{137}\text{Cs}$ , приведенные в главе 6, вклад его в общую поглощенную дозу незначителен. Автор приводит подробные данные о неоднородности загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  почв изучаемой территории.

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

Опираясь на Публикацию 108 МКРЗ автор развивает экоцентрическую концепцию радиационной защиты и в дополнение к понятиям «референтное животное или растение», «референтный уровень воздействия» предлагает ввести термин «референтный показатель», определяя его как «... радиационно-индуцированное изменение морфологического, физиологического, биохимического или др. показателя биоты на уровне вида, популяции или экосистемы в целом, которое может быть описано достоверной моделью, имеющей пороговое значение. Вопрос требует глубокой проработки, которая представлена в последующих главах.

5.1. В качестве первого референтного показателя автор использует ферментативную активность микробоценозов, которая характеризует реакцию почв на загрязнение их  $^{90}\text{Sr}$ . Значимые зависимости доза-эффект обнаружены только для каталазы.

В качестве замечания отмечу, что при таком способе оценки невозможно отделить ферменты микробиоты, от ферментов, связанных с корневой системой растений, или образовавшихся при разложении органического вещества. Если разделения сделать невозможно, полученные данные трудно интерпретировать.

Кроме того, хотелось бы видеть в работе обоснование выбора ферментов. Очевиден только выбор каталазы, которая катализирует разложение перекиси водорода. При радиационном воздействии всегда повышается количество активных форм кислорода, прежде всего пероксида водорода. Уреаза осуществляет разложение мочевины, инвертаза катализирует гидролиз сахара. Дегидрогеназа относится к классу оксидоредуктаз. Активность этих ферментов в значительной степени определяется количеством субстрата, а не облучением.

5.2. Проведено исследование радиоактивно-индуцированных изменений у двух видов моллюсков: янтарки и улитки кустарниковой. Показатели морфометрии янтарки в градиенте загрязнения либо не отличались от контроля, либо были трудны для интерпретации. А *Fruticicola fruticum* можно рассматривать как претендента на референтный вид, причем в качестве референтных показателей удобно использовать морфологические признаки.

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

Эта часть работы выполнена в рамках концепции критических нагрузок, величина которых определяется как «... максимальное поступление поллютанта, которое не сопровождается необратимыми изменениями в биогеохимической структуре, биоразнообразии и продуктивности экосистем в течение длительного времени». Ключевая задача – выявление видов-индикаторов и чувствительных к радиационному воздействию показателей. Концепция основана на пороговом воздействии факторов в рамках построения зависимости «доза – эффект» для видов-индикаторов. Критической нагрузкой считается доза в «точке» перегиба на кривых «доза – эффект».

6.1. Показана стимуляция каталазной активности почвы при увеличении содержания  $^{90}\text{Sr}$  от 1.83 до 1858 Бк/кг, что, по мнению автора, обусловлено «...развитием устойчивых форм микроорганизмов, которые в качестве субстрата используют отмершие клетки». Эта интерпретация пеясна и требует пояснений. Увеличение содержания  $^{90}\text{Sr}$  от 1880 до 5200 Бк/кг приводит к резкому падению активности каталазы из-за усиления генотоксического действия излучения на микроорганизмы.

6.2. Следующая ступень в определении критических нагрузок – анализ КН в системе «почва – крапива – наземный моллюск». КН  $^{90}\text{Sr}$  раковинами моллюсков снижается с ростом удельной активности крапивы, согласно степенной функции. Анализ показателя КН  $^{90}\text{Sr}$  раковинами в зависимости от удельной активности крапивы показал, что его можно считать референтным, а критической нагрузкой является удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в крапиве 2 kBk/kg, которой соответствует КН=1.

6.3. Несомненно, сильной стороной диссертации является раздел, посвященный оценке мощности поглощенных доз для референтного вида моллюска. Автор проводит сравнение разных методов расчета: программный пакет ERICA Tool, классические расчетные методы по формулам Р. Левинджера, Л.Д. Маринелли, а также специально разработанный для данного референтного объекта алгоритм расчета по методу Монте-Карло.

Оценка дозы в программе ERICA Tool сильно занижена, поскольку невозможен учёт облучения организма путем самооблучения и облучения от растительности. Классические формулы Р. Левинджера, Л.Д. Маринелли учитывают все источники облучения организма (почва, растительность, самособлучение). Однако в этих формулах не учитывается масса тела, у небольших объектов это может приводить к завышенным оценкам. Наиболее адекватные оценки дозы дает расчет методом Монте-Карло. Применение этого метода позволило автору учесть разные сценарии облучения моллюска (самооблучение: обитание на поверхности почвы; облучения моллюска в состоянии анабиоза в почве; облучения моллюска от крапивы), а также максимальное количество входных параметров (особенности источника облучения, время экспозиции, масса животного и удельная активность радионуклида на каждом локальном участке). Наибольший вклад в дозовую нагрузку формируется за счет самонаблюдения животного, а наименьший вклад вносит облучение от растительности.

6.4. Далее были проанализированы зависимости морфологических признаков моллюска от дозы. Выявлено линейное снижение массы раковин с ростом дозы. Однако эта зависимость не имеет порогового значения, т.е. невозможно определить критическую нагрузку, необходимую для оценки экологического риска. Референтным показателем может служить высота раковины, поскольку увеличение мощности дозы до 37 мГр/год приводит к увеличению высоты раковины, а дальнейшее увеличение дозы вызывает угнетение роста. Использованы выборки одного года, что исключает влияние погодных условий, а факторы плотность инкуляции, возраст животных были учтены при отборе.

6.5. Автором был проведен анализ дозовой зависимости уровня белков-металлтионинов в мягких тканях моллюсков. Изменение, что индукция белков-МТ является реакцией на стрессовые воздействия. Был поставлен лабораторный эксперимент с облучением интактных групп моллюсков в диапазоне доз 0.1–1 Гр и определением уровня белков-МТ, который выявил чувствительность показателя. Натурные исследования показали изменение содержания белков-МТ в теле моллюсков при дозах от 0.32 до 76 мГр/год. Изменение этого референтного показателя описывается уравнением кусочно-линейной модели. Пороговое значение мощности дозы составило 42.3 мГр/год.

6.6. Исследованы разные аспекты реакции моллюска *Fruticicola fruticum* на облучение в условиях радиоактивного загрязнения. Автор существенно пополнила массив данных о радиобиологических особенностях этого вида, обосновала референтные показатели. Представлены дозиметрические оценки, разработана математическая модель, учитывающая важнейшие параметры и разные сценарии жизни моллюски. Логичным завершением этих исследований стало обоснование использования *F. fruticum* в качестве референтного вида для развития экоцентрической системы радиационной защиты биоты.

## Глава 7. Оценка радиационного экологического риска по критическим нагрузкам

На данный момент методы оценки радиационного риска на экосистемном уровне практически не разработаны из-за сложности этой задачи. В данной главе автор провела оценки радиационного риска при расчете критических нагрузок, при анализе функций рисковой ситуации и выявление неопределенности. Риск оказался приемлемым с учетом следующих референтных показателей: каталазная активность почв, уровень белков-МТ, высота раковины моллюска. Оценка экологического риска с учетом КН  $^{90}\text{Sr}$  оказалась неприемлемой, поскольку уровень неопределенности этой оценки слишком высок. Автор дает качественную характеристику всех технологий оценки риска с точки зрения их неопределенности.

*В качестве замечания и пожелания для дальнейшей работы отмечу, что в числе факторов, повышающих неопределенность оценки критической нагрузки референтных видов желательно учесть модифицирующее действие условий окружающей среды. Абиотические факторы (температура, осадки) сейчас демонстрируют экстремальные колебания и способны нарушить равновесие в биоценозах.*

*Необходимо отметить неточность в использовании некоторых понятий. Термин «референтные показатели экосистемы» некорректен. В работе речь идет об отдельных компонентах экосистемы, необходимо называть вещи своими именами. Направление исследований по поиску референтных объектов (компонентов экосистем) очень важно и дает результаты, имеющие большое фундаментальное и прикладное значение. Попытки создать модели, прогнозирующие реакцию экосистем на облучение, предпринимались неоднократно. Однако прогнозы оказались слишком неточны, причем отклонения были как в сторону завышения, так и занижения критических доз. Зачастую нарушения, вызванные изменением межвидовых биоценотических отношений, перекрывали действие радиационного фактора. Поэтому, работая на экосистемном уровне, необходимо учитывать принцип эмерджентности: целое (экосистема) всегда больше суммы его частей и всегда имеет особые свойства, которых нет у составляющих компонентов, не объединенных системными связями.*

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

В данной главе автор проводит сравнение оценок воздействия радиационного фактора на человека и биоту в конкретном случае. Рассмотрены разные сценарии поступления радионуклидов в окружающую среду. В случае «утечки жидкости» (реальная ситуация) радиационный риск отнесен к категории «требуется оптимизация риска». В случае «ресуспензии пыли» радиационный риск для населения будет неприемлемый. Для сравнения уровней нагрузок применены индексы радиационного воздействия RIF<sub>h,b</sub>, которые учитывают дозы облучения человека и биоты, отнесенные к критическим дозовым нагрузкам. На основании рассчитанных индексов на изучаемой территории моллюск *F. fruticum* подвергается большему радиационному воздействию, чем человек. Подобные факты доказывают недостаточность принципа «если защищен человек, то защищена и биота» и требуют развития наряда с антропоцентристической концепцией и экоцентрического подхода к радиационной защите.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Диссертация Лаврентьевой Галины Владимировны является оригинальным законченным исследованием, выполненным на высоком профессиональном уровне. Работа вносит существенный вклад в развитие экоцентристической концепции радиационной защиты, а также в методологию мониторинга и прогнозирования состояния биогеоценозов и их отдельных компонентов после радиоактивного загрязнения. Работа основана на большом массиве данных, написана хорошим научным языком. Замечания, сделанные в отзыве, не умаляют значимости работы и не отражаются на выводах и основных положениях, выносимых на защиту.

Диссертация соответствует требованиям Постановление Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 01.10.2018) "О порядке присуждения ученых степеней", предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Лаврентьева Галина Владимировна заслуживает присуждения ученой степени доктора биологических наук по специальности 1.5.1 – Радиобиология.

Оппонент: Позолотина Вера Николаевна  
доктор биологических наук (специальность 03.02.08 – экология),  
зав. лабораторией популяционной радиобиологии  
Института экологии растений и животных УрО РАН  
Адрес: 620144 Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202  
Тел. (343) 210-38-58 доб. 118  
E-mail: [pozolotina@ipac.uran.ru](mailto:pozolotina@ipac.uran.ru)  
Сайт [https://ipac.uran.ru/Pozolotina\\_VN](https://ipac.uran.ru/Pozolotina_VN)



в №к 08 2021 г.

