

На правах рукописи



Колесник Ольга Владиславовна

**МОДИФИКАЦИЯ ЭФФЕКТОВ РАДИОНУКЛИДОВ ГУМИНОВЫМИ
ВЕЩЕСТВАМИ И ФУЛЛЕРЕНОЛОМ. БИОЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ МОНИТОРИНГ**

1.5.2. Биофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Красноярск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» – обособленном подразделении Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель: **Кудряшева Надежда Степановна,**
доктор физико-математических наук, профессор

Празднова Евгения Валерьевна,
доктор биологических наук
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южный федеральный университет» (ФГАОУ ВО «ЮФУ»), заведующая лабораторией «Молекулярная генетика микробных консорциумов» Академии биологии и медицины им. Д.И. Ивановского

Терехова Вера Александровна,
доктор биологических наук, профессор
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова), профессор кафедры земельных ресурсов и оценки почв факультета почвоведения

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный центр биологических систем и агротехнологий Российской академии наук» (ФГБНУ ФНЦ БСТ РАН), г. Оренбург

Защита диссертации состоится **«19» мая 2026 года в 14:00** на заседании диссертационного совета 24.1.228.03 на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» по адресу: 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 50.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ФИЦ КНЦ СО РАН и на сайте <https://www.ibp.ru/diser/diser.php>

Автореферат разослан «___» марта 2026 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических наук



Дементьев Дмитрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Широкое распространение низкоактивных радиоактивных загрязнений стало серьезным вызовом современности. Радиоактивное излучение характеризуется как продолжительностью воздействия радионуклидов, так и их концентрацией (или удельной радиоактивностью) в случае излучения альфа- и бета-типа или мощностью дозы гамма-излучения.

Чувствительность организмов к низкоинтенсивному радиационному воздействию недостаточно изучена, поэтому представляет в настоящее время особый интерес.

Известно, что присутствие некоторых веществ в окружающей среде может оказывать радиомодифицирующее действие на организмы: они могут как снижать, так и интенсифицировать отклики организмов на радиационное воздействие, т.е. оказывать радиопротекторное или радиосенсибилизирующее действие. Радиопротекторы и радиосенсибилизаторы могут иметь как искусственное, так и естественное происхождение, и их использование чрезвычайно перспективно для медицины и экологии.

Молекулярные механизмы биологических откликов на низкодозовое облучение в присутствии радиомодификаторов представляют практический интерес; выявленные закономерности их воздействий позволяют прогнозировать реакцию живых организмов на низкоинтенсивное излучение на больших территориях после ядерных аварий, сбросов атомных станций или подземных горных работ. К молекулярным механизмам низкодозовых эффектов относятся процессы, связанные с активными формами кислорода (АФК), которые могут возникать в результате радиолитиза воды в присутствии растворенного молекулярного кислорода, а также являться продуктом более сложных процессов, связанных с жизнедеятельностью организмов в условиях радиационного воздействия.

Для мониторинга радиационной токсичности в сложных многокомпонентных средах оптимальным является биотест, основанный на люминесцентных морских бактериях. В качестве тестируемого параметра используется интенсивность биолюминесценции. Преимуществами биотеста являются высокая чувствительность, простота, высокая скорость проведения анализа (1–3 мин), доступность приборов для регистрации токсичности. Эти преимущества обеспечивают возможность проведения большого числа анализов и оптимальную статистическую обработку, что важно для изучения эффектов низких доз, которые, как известно, характеризуются стохастичностью.

Степень разработанности темы исследования. Биолюминесцентный бактериальный биотест уже более 50 лет используется для мониторинга токсичности различных сред. Первое описание биотеста с использованием люминесцентных бактерий появилось в 1969 году в работе Косслера. Интенсивно ведутся исследования механизмов биолюминесценции и её применения; большая группа ученых работает в Красноярске с середины 70-х. Проводятся исследования закономерностей воздействия экзогенных соединений на биолюминесценцию бактерий и выделенные из них ферментативные системы (В. А. Кратасюк и коллеги, Е. Н. Есимбекова и коллеги, Н. С. Кудряшева и коллеги).

Изучение радиобиологических низкодозовых эффектов особенно активно началось с 70-х годов. Так, воздействие низкодозового излучения исследуется в России в таких организациях, как Институт биохимической физики им. Эмануэля (Е. Б. Бурлакова и коллеги), Федеральный научный центр гигиены имени Ф. Ф. Эрисмана (Л. С. Бондарева и коллеги), Уральский научно-практический центр радиационной медицины (Е. А. Блинова и коллеги, Ю. Р. Ахмадулина и коллеги), Красноярский государственный аграрный университет (А. С. Федотова и коллеги). Из зарубежных центров можно отметить Дюссельдорфский университет имени Генриха Гейне, Германия (Л. Е. Файнендеген и коллеги), Университет Мак-Мастер, Канада (К. Мазерсилл и коллеги), включая работы по воздействию на микроорганизмы (Дж. Г. Пол и коллеги, А. Томак и коллеги, Е.-Р. Джо и коллеги, Н. Мескита и коллеги, М. Ксавье и коллеги). Радиобиологические эффекты принято связывать с

включением активных форм кислорода и азота в сложные физико-химические и биохимические циклы (Э. Аззам и коллеги, В. И. Брусков и коллеги).

Ведутся исследования радиомодифицирующих свойств веществ природного и искусственного происхождения; выявляются вещества, способные эффективно предотвращать или снижать повреждения на клеточном уровне. В ряде исследований показана перспективность использования гуминовых веществ в качестве радиопротекторных агентов природного происхождения (И. В. Перминова и коллеги, Е. Липчинская-Кочаны и коллеги, Р. Клекинг и коллеги). Представляет интерес изучение и сравнение радиомодифицирующих свойств перспективных нанообъектов искусственного происхождения – фуллеренолов. Продемонстрированы их радиопротекторные свойства (Я. Грабовский и коллеги, С. В. Гудков и коллеги, В. А. Шилин и коллеги), а также выявлены и детально изучены антиоксидантные характеристики рядов фуллеренолов (Е. С. Сушко и коллеги, А. С. Сачкова и коллеги).

К настоящему времени сформировалась возможность характеристики радиопротекторной активности соединений с помощью клеточного бактериального биотеста, а также анализа молекулярных механизмов радиопротекции, связанных с активностью АФК и скоростями ферментативных процессов. Кроме того, чрезвычайно важна возможность использования результатов экспрессного клеточного биотеста для прогнозирования отклика высших организмов на воздействие радионуклидов в присутствии радиопротекторов.

В данной работе в качестве радиопротектора природного происхождения выбраны гуминовые вещества, а искусственного происхождения – фуллеренол. Оба соединения являются биологически активными углеродными наноструктурами. Исследования проводились в растворах альфа- и бета- излучающих радионуклидов (тория-232 и трития) низкой удельной радиоактивности. В качестве клеточного биотеста использованы люминесцентные морские бактерии, а высшего организма – кролики.

Цель работы: выявить и охарактеризовать радиопротекторные свойства гуминовых веществ и фуллеренола с помощью бактериальной биолюминесцентной тест-системы в условиях низкоинтенсивного радиационного воздействия.

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

1. Охарактеризовать радиомодифицирующие свойства гуминовых веществ и фуллеренола в растворах альфа- и бета-излучающих радионуклидов (тория-232 и трития) с помощью бактериального биолюминесцентного биотеста;
2. Выявить связь интенсивности биолюминесценции и содержания АФК в бактериальных суспензиях в присутствии трития и гуминовых веществ;
3. Продемонстрировать возможность использования бактериального биотеста в целях прогнозирования низкодозовых эффектов трития и радиопротекторной активности гуминовых веществ для клеточных процессов в высших организмах (на примере кроликов).

Научная новизна. Исследование направлено на выявление молекулярных механизмов низкоинтенсивных радиационных воздействий в условиях варьирования молекулярного окружения клеточного организма, что чрезвычайно актуально для экологических мероприятий и медицины. С помощью биолюминесцентного клеточного биотеста изучены радиопротекторные свойства нанообъектов природного (гуминовые вещества) и искусственного (фуллеренол) происхождения. Продемонстрирована роль активных форм кислорода и ферментативных процессов в биоэффектах тория-232 и трития в отсутствие и в присутствии потенциальных радиопротекторов. Показана принципиальная возможность использования модельного клеточного организма (люминесцентных бактерий) для прогнозирования результатов воздействий низкодозовой радиации и выявления радиомодифицирующей активности биологически активных соединений для высших организмов.

Теоретическая и практическая значимость работы. С теоретической точки зрения, изучение роли АФК и ферментативных процессов способствует пониманию молекулярных механизмов воздействия радиации на биологические системы, а также формирует основу для прогнозирования результатов таких воздействий. Особо значимым является понимание

молекулярных механизмов воздействия радиации при варьировании молекулярного окружения живых клеток. С практической стороны, эти данные служат базой для разработки эффективных методов радиомодификации и управления последствиями радиационных воздействий, что особенно актуально в условиях роста низкоинтенсивных радиоактивных загрязнений окружающей среды. Практическую значимость имеет также продемонстрированная возможность использования результатов экспрессного бактериального биотеста для прогнозирования воздействия субклинических доз радиации на высшие организмы.

Положения, выносимые на защиту:

1. Активация и ингибирование биолюминесценции бактерий при низкодозовом воздействии тория-232 и трития сопровождаются изменением содержания АФК как в присутствии, так и в отсутствие радиомодификаторов;

2. Гуминовые вещества и фуллеренол нейтрализуют как активирующее, так и ингибирующее действие трития на бактерии;

3. Отклики клеток бактерий и высшего организма (т.е. интенсивность биолюминесценции и фагоцитарная активность клеток крови кроликов) на низкодозовое воздействие трития и гуминовых веществ аналогичны.

Достоверность полученных результатов подтверждена достаточным объемом данных, их воспроизводимостью, а также использованием современных методов исследования и статистического анализа при проведении научной работы.

Апробация работы. Основные результаты работы представлены на российских и международных конференциях: 10-ой встрече молодых ученых-экологов SETAC Europe (онлайн, 2021); Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXIV) (Красноярск, Россия, 2021); Международной сателлитной конференции «Экологический мониторинг. Методы и подходы» (Красноярск, Россия, 2021); Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXV) (Красноярск, Россия, 2022); Междисциплинарной конференции молодых учёных ФИЦ КНЦ СО РАН (КМУ-XXVI) (Красноярск, Россия, 2023); XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных «Перспектива – 2023» (Красноярск, Россия, 2023); Международной научно-практической конференции «Радиобиология и экологическая безопасность – 2023» (Гомель, Республика Беларусь, 2023); Международной научно-практической конференции «Здоровье и окружающая среда» (Минск, Республика Беларусь, 2024); VIII Международной научно-практической конференции «Хроническое радиационное воздействие: медико-биологические эффекты малых доз» (Челябинск, Россия, 2025); XI Российской конференции «Радиохимия-2025 (Красноярск, Россия, 2025)».

Работа была выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда №23-26-10018 «Прогнозирование реакции сельскохозяйственных животных на низкоинтенсивную радиацию и применение радиопротекторов. Экспрессный биолюминесцентный скрининг радиобиологических эффектов» (2023–2024, исполнитель).

Работа удостоена диплома II степени за победу на Всероссийском Конкурсе научно-исследовательских проектов «Шаг в будущее : результаты научных исследований» в номинации «Результаты научных исследований в области экологии» (Елец, Россия, 2021), премии Фонда Осаму Шимомуры за успешное исследование в области биолюминесценции (Красноярск, Россия, 2023 г.), победы III Всероссийского Конкурса «К вершинам науки» по направлению «Результаты научных исследований в области химии и фармакологии» (Елец, Россия, 2024).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 26 работ, из них 5 статей, входящих в базы Scopus и Web of Science, ВАК, Белый список, 21 публикация в сборниках докладов научных конференций.

Личный вклад автора заключается в планировании экспериментов, обработке и интерпретации полученных результатов, их обсуждении, сопоставлении полученных данных с литературными. Все экспериментальные исследования, включенные в диссертационную

работу, выполнены лично либо при непосредственном участии автора. Результаты исследования были представлены лично автором в виде устных и стендовых докладов на международных конференциях, автор также принимал основное участие в подготовке статей и тезисов к публикации. Часть экспериментальных результатов была получена совместно с Федотовой А. С., Жигаревым А. А., Лапиной М. А., Соловьёвым В. С. и Грабовым А. С. В обсуждении результатов участвовали Бадун Г. А. и Стом Д. И. Вклад соавторов отражен в публикациях. Автор благодарит всех коллег за участие в совместных исследованиях и в обсуждении результатов.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, обзор литературы, описание методов исследования, главу с изложением результатов работы, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы и приложение. Работа изложена на 108 страницах машинописного текста, проиллюстрирована 1 таблицей и 25 рисунками. Библиография включает 251 источник.

Обозначения:

НТО	– тритиевая вода
<i>I</i>	– интенсивность биолюминесцентного или хемилюминесцентного сигналов
<i>P. phosphoreum</i>	– <i>Photobacterium phosphoreum</i>
РСНО	– альдегид (тетрадеканаль)
<i>V. fischeri</i>	– <i>Vibrio fischeri</i>
АФК	– активные формы кислорода
ГВ	– гуминовые вещества
КРАБ	– комплект реактивов аналитическое биолюминесценции
НАД(Ф)Н	– никотинамиддинуклеотидфосфат восстановленный
НАДН	– никотинамиддинуклеотид восстановленный
ФМН	– флаavinмононуклеотид
ЛПЭ	– линейная передача энергии

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность проблемы, обоснованы цели и задачи, определена научная и практическая новизна исследования.

В первой главе диссертации приводится обзор литературы по влиянию радионуклидов на живые организмы. Рассмотрены предпосылки использования биотестов на основе люминесцентных бактерий для изучения биоэффектов радионуклидов. Уделено внимание использованию потенциальных радиопротекторов природного (гуминовые вещества) и искусственного (фуллеренолы) происхождения. Обоснованы преимущества биолюминесцентного тестирования для мониторинга токсичности радионуклидов.

Вторая глава диссертации посвящена описанию материалов и методов исследования. В работе использовали интактные бактерии *P. phosphoreum* 1883 IBSO из коллекции Института Биофизики СО РАН (Красноярск). Также использовали препарат «Микробиосенсор–677Ф», изготовленный на основе люминесцентных бактерий *P. phosphoreum* 1883 IBSO в Институте Биофизики СО РАН (Красноярск). Для имитации морской среды и баланса осмотических процессов использовали 3%-й водный раствор NaCl (ЗАО Химреактивснаб, Россия).

Воздействие на ферментативные процессы оценивали при использовании комплекта реактивов аналитической биолюминесценции (КРАБ), который включает лиофилизированные препараты люциферазы *Photobacterium leiognathi* (0,5 г/л) и НАД(Ф)Н:ФМН-оксидоредуктазы из *Vibrio fischeri* (0,15 ед. активности).

Содержание АФК в растворах и суспензиях определяли хемилюминесцентным методом с использованием люминола, гидроксида калия (ЗАО Химреактивснаб, Россия), гексацианоферрата калия ($K_3[Fe(CN)_6]$) (Химреактив, Россия). Оценка содержания АФК проводилась с использованием калибровочной зависимости интенсивности хемилюминесценции от концентрации модельного АФК (пероксида водорода, H_2O_2).

Источником альфа-излучения служил азотнокислый торий-232 ($\text{Th}(\text{NO}_3)_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$). В качестве источника бета-излучения использовали радионуклид тритий в составе тритиевой воды (НТО). Данный препарат был предоставлен кафедрой радиохимии МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва.

В качестве источника гуминовых веществ использовали препарат Гумат-80 (ООО «Гумат», Иркутск, Россия).

Фуллеренол $\text{C}_{60,70}\text{O}_y(\text{OH})_x$ ($x = 22-24$, $y = 2-4$) был получен и охарактеризован в Институте Физики им. Л.В. Киренского СО РАН (Красноярск, Россия).

Для регистрации кинетики биолюминесцентного и хемилюминесцентного сигналов был использован планшетный люминометр Luminoskan Ascent (Thermo Electron Corporation, США). Измерения интенсивности биолюминесцентного и хемилюминесцентного сигналов проводили при комнатной температуре (20°C).

Скорости окисления NADH определяли, используя изменение оптической плотности раствора, D , в максимуме поглощения НАДН, 340 нм, на спектрофотометре UVIKON-943 (KONTRON Instruments, Italy).

Каждое измерение проводили в 3–5 повторностях. Погрешность измерений интенсивности биолюминесценции бактериальной, ферментативной систем и хемилюминесценции люминола не превышала соответственно 5, 10 и 15%.

Статистическая обработка результатов, построение графиков и таблиц проводились с использованием пакетов прикладных программ MS Office (Microsoft, США). Корреляционную связь оценивали по критерию Спирмена. Коэффициенты корреляции, r , рассчитывали при помощи программы Statistica 10 (StatSoft Inc., США). Для оценки различий между группами данных использовали непараметрический критерий Манна-Уитни. Уровень статистической значимости считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Для оценки возможности прогнозирования низкодозовых воздействий трития на высшие организмы использовали калифорнийских кроликов в возрасте 7 месяцев ($4,4 \pm 0,3$ кг). Животных разделили на экспериментальную (10 особей) и контрольную (15 особей) группы. Кроликов экспериментальной группы поили водой с НТО (1 МБк/л) в течение 4, 10 и 20 дней. После этого вводили гуминовые вещества (10^{-3} г/л) в 1 МБк/л НТО (НТО+ГВ) в течение 20 дней. Анализировали 2 типа физиологических параметров кроликов: общие клинические (температура тела, частота дыхания, сердцебиения, вес и т.д.) и клинико-гематологические показатели периферической крови кроликов (фагоцитарная активность лейкоцитов). Эксперименты проводились в лаборатории кафедры внутренних незаразных болезней, акушерства и физиологии сельскохозяйственных животных на зооферме Института прикладной биотехнологии и ветеринарной медицины Жигаревым А. А. и Федотовой А. С.

В третьей главе диссертации приведены экспериментальные результаты.

Раздел 3.1 посвящён воздействию нитрата тория-232 на интенсивность биолюминесценции морских бактерий в отсутствие и в присутствии потенциальных радиопротекторов – гуминовых веществ и фуллеренола.

3.1.1 Воздействие нитрата тория-232 на люминесцентные морские бактерии

На Рисунке 1 представлены интенсивность биолюминесценции и содержание АФК в бактериальной суспензии при различных концентрациях нитрата тория-232 ($C = 10^{-15}-10^{-3}$ М).

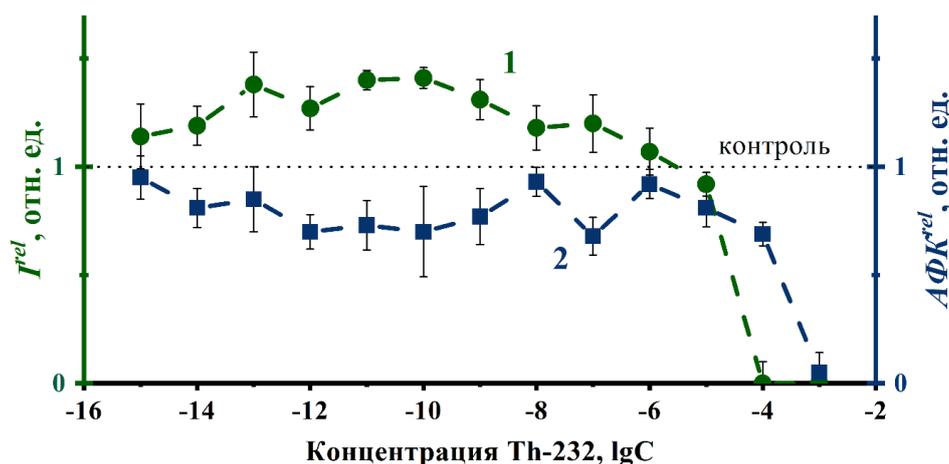


Рисунок 1 – Относительные значения интенсивности билюминесценции, I^{rel} , (1) и содержания АФК, AFK^{rel} , (2) в бактериальной суспензии при различных концентрациях тория-232. Время воздействия – 1 час. Содержание АФК в контрольном образце – $5,5 \cdot 10^{-6}$ М

При низких концентрациях нитрата тория (10^{-5} – 10^{-15} М) наблюдали умеренную активацию билюминесценции ($1,0 < I^{rel} < 1,5$) (Рисунок 1, кривая 1). Этот эффект описывается в рамках модели гормезиса [Jargin, 2018; Calabrese, 2019; Agathokleous, 2025]. При высоких концентрациях ($> 10^{-5}$ М) происходило ингибирование свечения ($I^{rel} < 1,0$). В широком интервале концентраций тория (10^{-3} – 10^{-15} М) наблюдали небольшое снижение содержания АФК ($AFK^{rel} < 1,0$, Рисунок 1, кривая 2) по сравнению с контрольным образцом. Наиболее выраженный спад содержания АФК наблюдали при высоких концентрациях тория (Рисунок 1, кривая 2), как и в случае билюминесценции (Рисунок 1, кривая 1). Выявлена умеренная отрицательная корреляция $r = -0,67$ ($p \leq 0,05$) между зависимостями интенсивности билюминесценции и содержания АФК от концентрации тория (Рисунок 1, кривые 1 и 2) в диапазоне его низких концентраций (10^{-15} – 10^{-6} М).

Была выявлена положительная корреляция ($r = 0,74$; $p \leq 0,05$) между рН растворов и содержанием АФК в широком диапазоне концентраций тория (10^{-8} – 10^{-4} М). Следовательно, спад содержания АФК и билюминесценции при высоких концентрациях тория-232 ($I^{rel} < 1$, Рисунок 1) можно связать с повышением кислотности [Kolesnik et al., 2021] в концентрированных растворах тория.

Проанализированы кинетические кривые бактериальной билюминесценции и содержания АФК в присутствии нитрата тория-232. В качестве примера на Рисунок 2 приведены кинетические кривые для I^{rel} и AFK^{rel} при концентрации тория-232, равной 10^{-10} М. Эти кривые визуально подтверждают обратную взаимосвязь между интенсивностью бактериальной билюминесценции и концентрацией АФК в растворах тория-232. Выявили умеренную обратную корреляцию ($r = -0,67$; $p \leq 0,05$) между зависимостями I^{rel} и AFK^{rel} от времени.

Выявленные обратные корреляции между зависимостями интенсивности билюминесценции и содержания АФК от концентрации тория, Рисунок 1 (или времени его воздействия, Рисунок 2), указывают на возможность интенсификации физиологических процессов бактерий с участием АФК в водных растворах, включая растворенный молекулярный кислород.

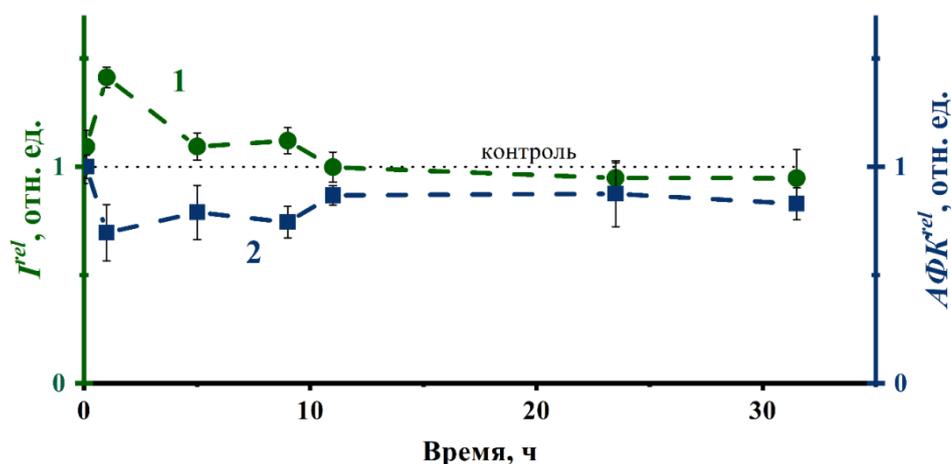


Рисунок 2 – Интенсивность бактериальной биолюминесценции, I^{rel} , (1) и содержание АФК, $АФК^{rel}$, (2) при различных временах воздействия тория-232. Концентрация тория-232 – 10^{-10} М

Следует отметить, что бактериальный биотест не обнаружил токсического (ингибирующего) эффекта тория-232 при физиологических значениях рН ($pH > 5,0$); наблюдались лишь умеренные, но достоверные активационные эффекты.

3.1.2 Воздействие нитрата тория-232 на бактериальные ферменты

Проанализировано влияние нитрата тория-232 на биолюминесценцию ферментативной системы и на содержание АФК в этой системе (Рисунок 3). Сравнение Рисунков 2 и 3 указывает на сходство эффектов тория в бактериальной и ферментативной системах. Вероятно, активация ферментативной системы вносит вклад в низкоконтрационные активационные эффекты тория-232 для клеточного организма и также связана с потреблением АФК в ходе биолюминесцентной реакции.

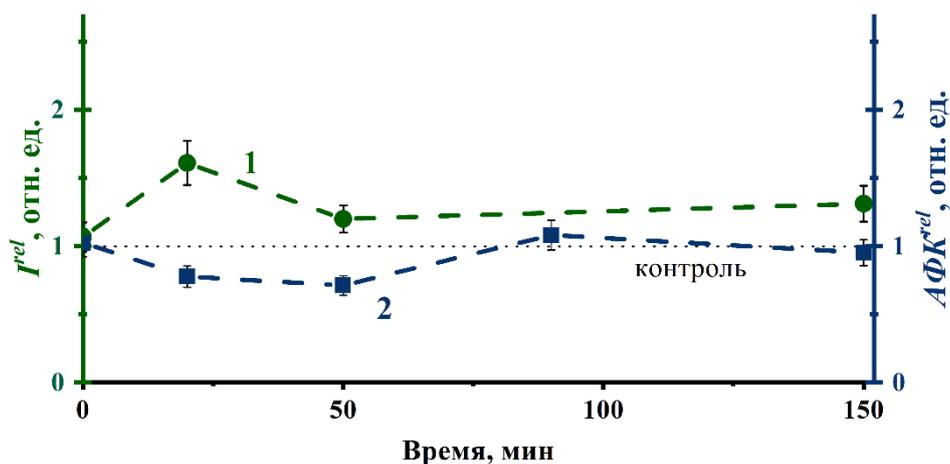


Рисунок 3 – Интенсивность бактериальной биолюминесценции, I^{rel} , (1) и содержание АФК, $АФК^{rel}$, (2) при различных временах воздействия тория-232. Концентрация тория – 10^{-9} М

С помощью спектрофотометрического метода определяли скорости окисления НАДН в ферментативной системе в присутствии тория-232. Результаты приведены в Таблице 1.

Из Таблицы 1 видно, что скорость автоокисления НАДН равна 2,0 М/мин (первый столбец). Добавление эндогенного окислителя ФМН ускоряет реакцию расходования NADH в 8 раз (до 16,2 М/мин).

Таблица 1 – Скорости расходования НАДН в ферментативной системе с различным содержанием компонентов в отсутствие и в присутствии тория-232. Длина волны регистрации оптической плотности – 340 нм. Концентрация тория-232 – 10^{-7} М. Концентрация ГВ – 10^{-4} г/л

№	Состав системы	$V \cdot 10^8, \text{ М/мин}$		
		в отсутствие тория-232	в присутствии тория-232	в присутствии тория-232 и ГВ
1	НАДН	$2,0 \pm 0,3$	$6,1 \pm 0,5$	$8,8 \pm 0,6$
2	НАДН + ФМН	$16,2 \pm 0,4$	$26,7 \pm 0,7$	$36,8 \pm 0,8$

При добавлении тория-232 (второй столбец) скорость автоокисления НАДН увеличивается в 3 раза (до 6,1 М/мин). Добавление эндогенного окислителя, ФМН, увеличивает скорости окислительно-восстановительных процессов с участием биологически важных молекул (НАДН и ФМН) и ферментов, что вносит вклад в активацию биолюминесценции ферментативной системы торием-232, продемонстрированной на Рисунке 3.

3.1.3 Изучение радиопротекторной активности гуминовых веществ и фуллеренола в растворах нитрата тория-232

Изучено влияние ГВ на биолюминесценцию бактерий в растворах нитрата тория-232. Показано, что ГВ достоверно не изменяли кинетику биолюминесценции, т.е. модификация биоэффектов тория не была подтверждена экспериментально (рисунки приведены в диссертации).

Проанализировано влияние ГВ на ферментативную систему в растворах нитрата тория-232. В качестве примера на Рисунке 4 приведена зависимость I^{rel} от времени при концентрации тория, равной 10^{-9} М.

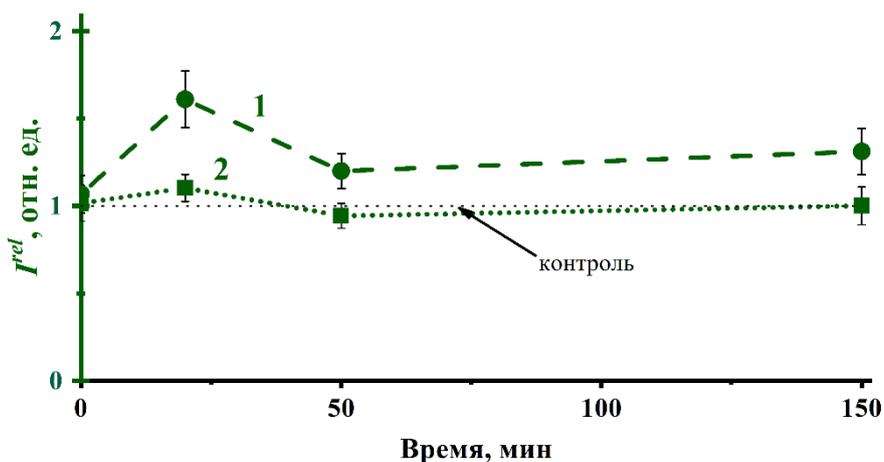


Рисунок 4 – Кинетика биолюминесценции, I^{rel} , в ферментативной системе при воздействии тория-232 в отсутствие (1) и в присутствии (2) гуминовых веществ. Концентрация тория – 10^{-9} М. Концентрация гуминовых веществ – 10^{-4} г/л

Как видно из Рисунка 4, кривая 2, ГВ смещают кинетическую кривую биолюминесценции к контролю ($I^{rel} \approx 1$), тем самым нейтрализуя воздействие тория на ферментативную систему. Однако такие изменения ферментативной активности под действием ГВ не проявились на клеточном уровне, как сказано выше.

Также было проанализировано влияние ГВ на скорости окисления НАДН в присутствии тория-232. Как видно из сравнения двух последних столбцов Таблицы 1, ГВ дополнительно увеличивают как скорость окисления НАДН, так и скорость окисления этого вещества эндогенным окислителем ФМН, что не может объяснить «смягчения» эффекта

активации ферментативной билюминесценции гуминовыми веществами, продемонстрированного на Рисунке 4. Вероятно, другие процессы, не связанные с увеличением скоростей ферментативных редокс реакций, ответственны за нейтрализацию эффекта тория гуматами в ферментативной билюминесцентной системе. Это может быть комплексообразование с участием активных групп гуматов.

Исследовано влияние фуллеренола на билюминесценцию бактерий и их ферментов в растворах нитрата тория-232. Модификации эффектов тория фуллеренолом не было обнаружено, что указывает на низкую радиопротекторную активность фуллеренола в низкоконтрационных растворах нитрата тория-232.

Таким образом, показано, что в растворах нитрата тория-232 ($< 10^{-5}$ г/л) биоактивные соединения природного и искусственного происхождения (гуминовые вещества и фуллеренол) не проявили заметной радиопротекторной активности на клеточном уровне. Можно предположить, что именно малая эффективность воздействия тория на бактерии ($1,0 < I^{rel} < 1,5$, Рисунки 1–2) определяет отсутствие радиопротекторной активности гуминовых веществ и фуллеренола.

Раздел 3.2 посвящён влиянию бета-излучающего радионуклида трития на интенсивность билюминесценции морских бактерий и содержание АФК как в отсутствие, так и в присутствии потенциальных радиопротекторов – гуминовых веществ и фуллеренола.

3.2.1 Воздействие трития на интенсивность билюминесценции и содержание активных форм кислорода

Интенсивность бактериальной билюминесценции и содержание АФК при различных временах воздействия трития (в виде тритиевой воды, НТО) показаны на Рисунке 5А–Б.

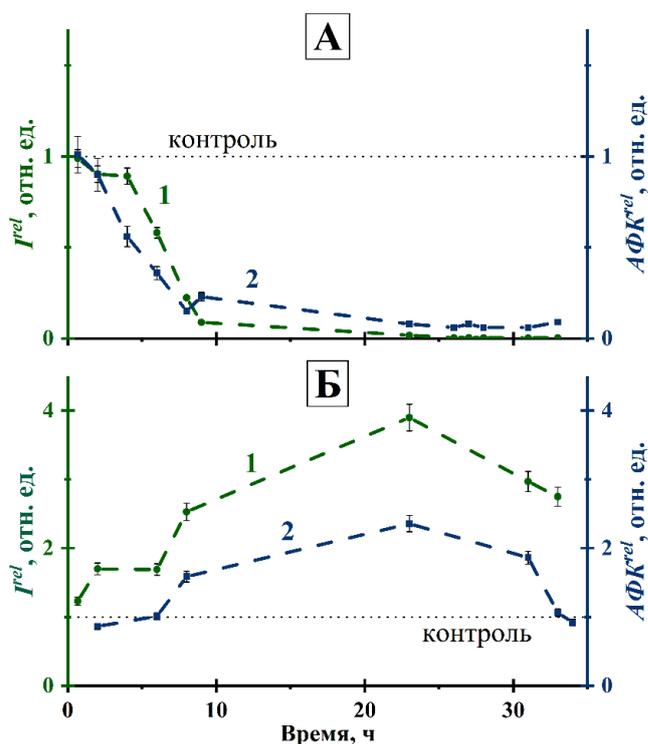


Рисунок 5 – Интенсивность бактериальной билюминесценции, I^{rel} , (1) и содержание АФК, $АФК^{rel}$, (2) в НТО.
 Удельная активность НТО:
 (А) 2 МБк/л;
 (Б) 50 МБк/л

Из Рисунка 5 видно, что при низкой удельной активности (2 МБк/л) происходит ингибирование билюминесцентного отклика (Рисунок 5А, кривая 1), а при повышении радиоактивности (50 МБк/л) – его активация (Рисунок 5Б, кривая 1). Данный эффект НТО соответствует модели гормезиса. Известно, что в рамках этой модели, умеренное ингибирование физиологических функций при низких дозах соответствует стадии распознавания стресса, увеличение дозы приводит к активации (стадия адаптивного отклика с включением компенсаторных эффектов), а дальнейшее повышение дозы – к ингибированию

(стадия токсичности) [Jargin, 2018; Calabrese, 2019]. Мы полагаем, что эффекты на Рисунках 5А–Б соответствуют двум первым стадиям модели гормезиса.

Как видно из Рисунка 5А–Б (кривые 2), тенденция изменения содержания АФК в бактериальной суспензии схожа с биолюминесцентным откликом. Понижение содержания АФК (Рисунок 5А, кривая 2) вероятно связано с ингибированием физиологических функций бактерий, включая биолюминесценцию. Активацию биолюминесценции (Рисунок 5Б, кривая 1) можно объяснить дополнительным выделением АФК (Рисунок 5Б, кривая 2) в мембранных и ферментативных процессах. Ферментативный биолюминесцентный процесс, как известно [Hastings and Gibson, 1963], включает световые и темновые пути генерации АФК с образованием интермедиатов биолюминесцентной реакции и H_2O_2 соответственно. Определяемый уровень АФК соответствует балансу между потреблением и генерацией АФК бактериями.

Рассчитаны коэффициенты корреляции r между зависимостями интенсивности биолюминесценции и содержания АФК от времени воздействия НТО. Их величины оказались равными 0,99 и 0,70 соответственно для удельной радиоактивности 2 МБк/л (Рисунок 5А) и 50 МБк/л (Рисунок 5Б). Высокие значения коэффициентов корреляции указывают на возможность участия АФК в эффектах ингибирования и активации биолюминесценции тритиевой водой.

Известно, что тритий в форме тритиевой воды равномерно облучает всю клетку, при этом происходит ионизация и возбуждение молекул воды и органических молекул с образованием АФК, влияющих на эффективность мембранных процессов бактерий [Rozhko et al., 2016]. Наши результаты указывают на связь содержания АФК в водных бактериальных суспензиях с эффективностью физиологических функций бактерий (интенсивностью биолюминесценции). Данная связь осуществляется вероятно с участием мембранных процессов.

3.2.2 Радиопротекторная активность гуминовых веществ в тритиевой воде

В качестве радиопротекторов природного происхождения были использованы гуминовые вещества (ГВ). Было проанализировано влияние ГВ на кинетику биолюминесценции. Результаты представлены на Рисунке 6А–Б.

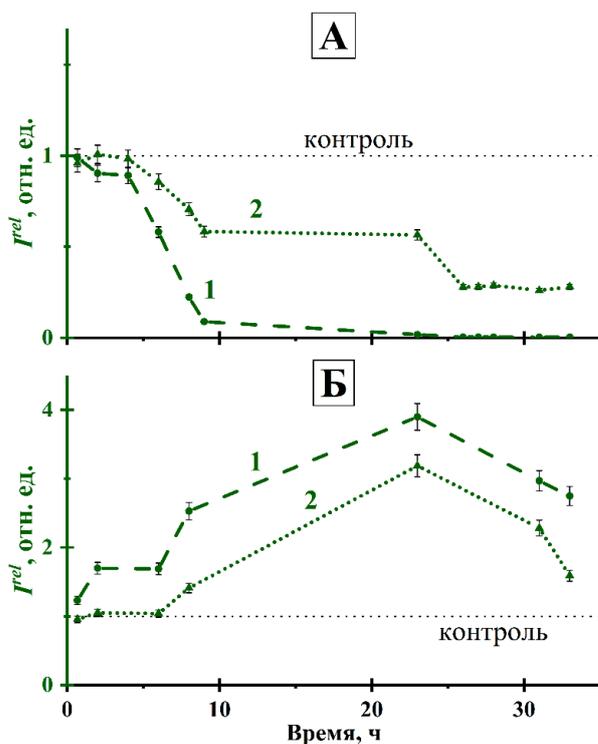


Рисунок 6 – Интенсивность бактериальной биолюминесценции, I^{rel} , в НТО в отсутствие (1) и в присутствии (2) гуминовых веществ. Удельная активность НТО: (А) 2 МБк/л; (Б) 50 МБк/л. Концентрация гуминовых веществ – 10^{-3} г/л

Наблюдали, что ГВ смещают кинетические кривые к контролю нейтрализуя воздействие НТО, как в случае ингибирования (Рисунок 6А, кривая 2), так и в случае активации (Рисунок 6Б, кривая 2) биолюминесценции.

Нейтрализующее действие ГВ может быть связано с их полифункциональностью. Поскольку ГВ содержат множество электронодонорных и электроноакцепторных групп, они могут действовать как своего рода «буфер» в процессах переноса электронов и нейтрализации ионных и радикальных процессов в биологических системах.

Проанализировано содержание АФК в бактериальных суспензиях с НТО в отсутствие и присутствии ГВ. Результаты представлены на Рисунке 7А–Б.

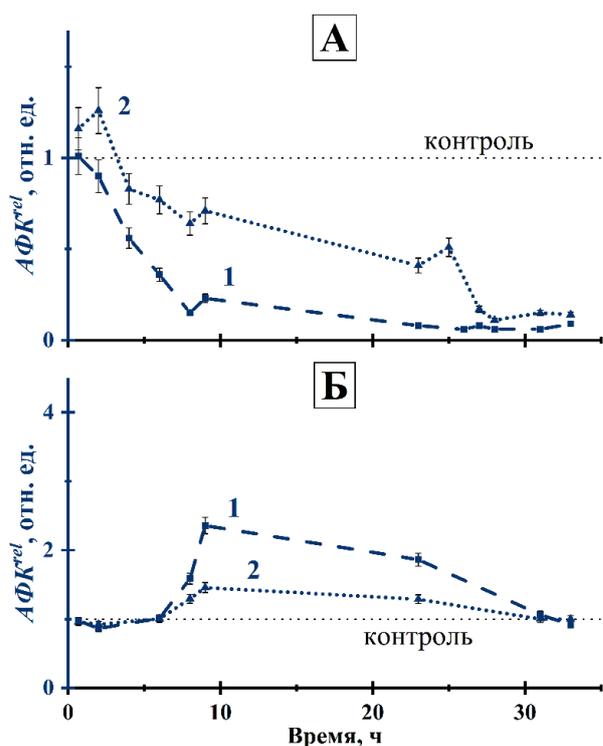


Рисунок 7 – Содержание АФК, АФК^{rel}, в НТО в отсутствие (1) и в присутствии (2) гуминовых веществ Бактериальная система.

Удельная активность НТО:

(А) 2 МБк/л;

(Б) 50 МБк/л.

Концентрация гуминовых веществ – 10^{-3} г/л.

Содержание АФК в контрольном образце – 10^{-6} М

Добавление ГВ приближает кинетические кривые АФК к контролю (Рисунок 7А–Б, кривая 2), следовательно, нейтрализует действие НТО на АФК. Представленные данные подтверждают предположение о том, что эффект ГВ связан с их способностью к обратимому присоединению/отдаче электрона, приводящей к регулированию содержания радикальных кислородсодержащих частиц в бактериальной суспензии [Zhang et al., 2018; Han et al., 2022].

Полученные результаты свидетельствуют о вовлечении ГВ в регуляцию содержания АФК в бактериальных суспензиях и, следовательно, в интенсивность бактериальной биолюминесценции. Для подтверждения этой взаимосвязи были рассчитаны коэффициенты корреляции между зависимостями интенсивности биолюминесценции и содержания АФК от времени в бактериальной суспензии в НТО + ГВ. Они составили 0,95 ($p \leq 0,05$).

Обращают на себя внимание различия между воздействиями радионуклидов тория-232 и трития на бактерии: эффективность активации биолюминесценции бактерий тритием была значительно выше; коэффициенты корреляции r между зависимостями интенсивности биолюминесценции и содержания АФК от времени имели противоположные знаки. Такие различия можно связать с радиационной и химической природой трития и тория, а также их содержанием в бактериальной суспензии в условиях эксперимента. Как упоминалось ранее, тритий – бета-излучающий радионуклид с низкой энергией излучения (максимальная энергия бета-частиц 18,6 кэВ). Для бета-излучения характерна низкая линейная передача энергии (ЛПЭ) (~ 0,2–0,3 кэВ/мкм); пробег бета-частиц трития в клетках мал – несколько мкм. Тритий в форме тритиевой воды создает равномерно распределенный окислительный стресс по всему

объему клетки и стимулирует клеточный адаптационный отклик, при участии АФК. Альфа-излучение тория характеризуется высокой ЛПЭ (~ 50–100 кэВ/мкм) и пробегом в клетке около 30 мкм, что приводит к сильным биологическим эффектам при высоких удельных активностях растворов. Однако из-за низкой удельной активности растворов тория в данном исследовании (~ 1 мБк/л) умеренную активацию биолюминесценции вероятно следует рассматривать как низкоконцентрационный эффект тяжелого металла в биологических системах.

3.2.3 Радиопротекторная активность фуллеренола в тритиевой воде

В качестве радиопротектора искусственного происхождения выбран фуллеренол – водорастворимое производное фуллеренов. Выбор вида и концентраций фуллеренола основан на исследованиях Kovel et al., 2019; 2021, которые позволили исключить интервал его токсичного содержания. Выбранные концентрации фуллеренола составили 10^{-12} – $3 \cdot 10^{-3}$ г/л.

Изучено влияние трития на бактериальную биолюминесценцию в отсутствие и в присутствии фуллеренола. В качестве примера активности фуллеренола на Рисунке 8 приведены кинетические кривые биолюминесценции бактерий в НТО в отсутствие (1) и в присутствии (2) фуллеренола при активности НТО – 500 МБк/л и концентрации фуллеренола – 10^{-11} г/л.

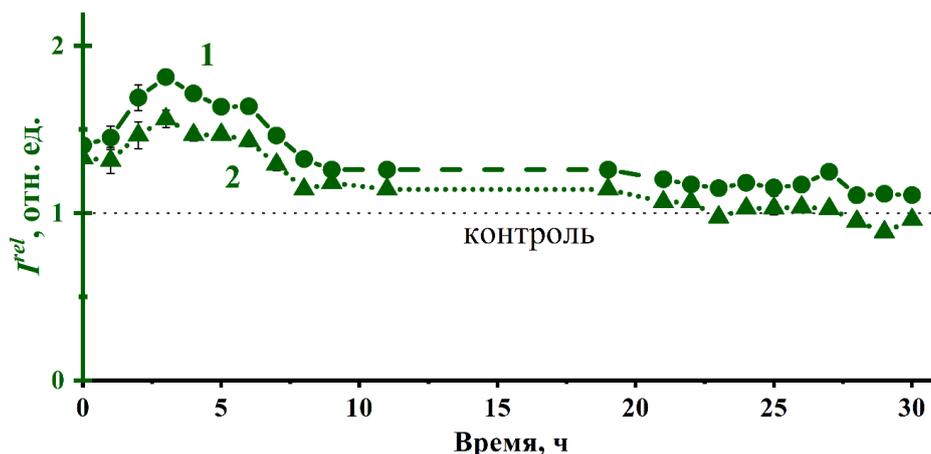


Рисунок 8 – Кинетика бактериальной биолюминесценции, I^{rel} , в НТО в отсутствие (1) и в присутствии (2) фуллеренола. Удельная активность НТО – 500 МБк/л. Концентрация фуллеренола – 10^{-11} г/л

Из рисунка видно, что в отсутствие фуллеренола происходила активация биолюминесценции (Рисунок 8, кривая 1) при 0–9 часах хронического воздействия. Затем интенсивность биолюминесценции I^{rel} снижалась до контрольных значений. В присутствии фуллеренола (Рисунок 8, кривая 2) наблюдалось небольшое, но достоверное ($p \leq 0,05$) смещение кинетической кривой ближе к контролю, что соответствует нейтрализации эффектов трития. Этот результат связан с антирадикальными свойствами фуллеренола [Chen et al., 2004; Injac et al., 2013]. Рисунок 9А иллюстрирует описанный выше нейтрализующий эффект фуллеренола в НТО при времени воздействия 4 часа.

Рисунок 9А иллюстрирует также достоверное снижение I^{rel} биолюминесценции ферментативной системы тритиевой водой до 0,75 по сравнению с нерадиоактивным контролем (Рисунок 9А, столбец 1), связанное вероятно с повышением ионизации среды. Добавление фуллеренола нейтрализовало этот эффект (Рисунок 9А, столбец 2), что указывает на возможность его участия в процессах перераспределения электронной плотности в водных средах.

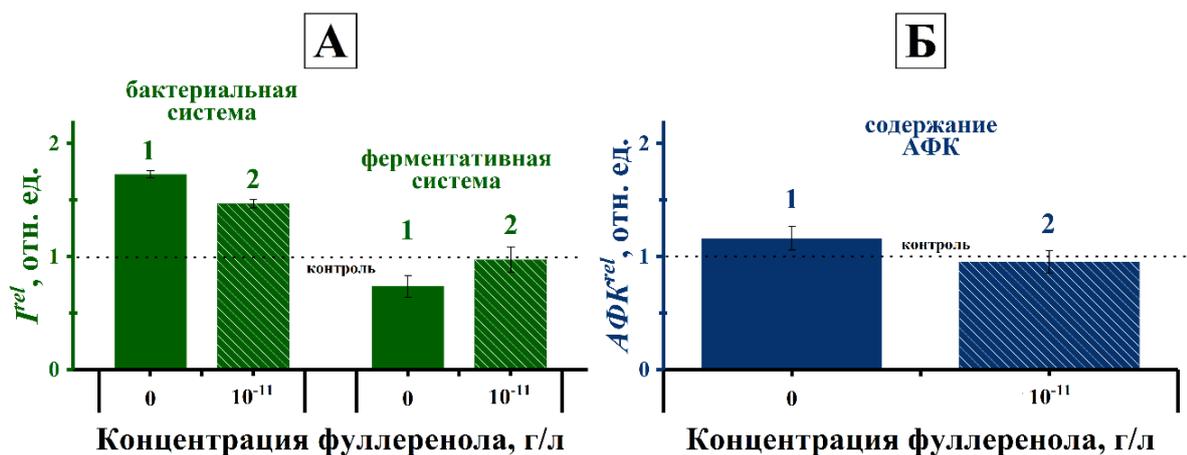


Рисунок 9 – Относительная интенсивность билюминесценции, I^{rel} , и содержание АФК, $AФК^{rel}$, в НТО в отсутствие (1) и в присутствии (2) фуллеренола ($C = 10^{-11}$ г/л). Время воздействия – 4 часа. Удельная радиоактивность НТО – 500 МБк/л. (А) бактериальная и ферментативная билюминесценция, (Б) содержание АФК в бактериальной среде в присутствии НТО. Контроль – интенсивность билюминесценции в отсутствие НТО и фуллеренола

Известно, что АФК способны накапливаться в радиоактивной бактериальной среде, стимулируя интенсивность билюминесценции [Selivanova et al., 2014; Rozhko et al., 2019]. Зарегистрировано небольшое, но достоверное увеличение содержания АФК в бактериальной суспензии при воздействии трития, по сравнению с нерадиоактивной средой (до $I^{rel} = 1,2$) Рисунок 9Б, столбец 1). Добавление фуллеренола приблизило содержание АФК к контролю (Рисунок 9Б, столбец 2). Этот эффект иллюстрирует антирадикальную активность фуллеренола в бактериальной суспензии.

Таким образом, на примере клеточного и ферментативного билюминесцентных процессов (клеточного и ферментативного) показано, что фуллеренол в НТО обладает умеренными радиопротекторными свойствами, приближая интенсивность билюминесценции бактерий к контрольным значениям ($I^{rel} \approx 1$). Вероятно, это связано с электроноакцепторной (антрадикальной) активностью фуллеренола, способствующей снижению АФК.

Раздел 3.3 посвящён исследованию возможности прогнозирования низкодозовых воздействий трития на клеточные процессы высших организмов на основе результатов бактериального биотеста.

3.3.1 Сравнение эффектов трития на интенсивность билюминесценции бактерий и фагоцитарную активность лейкоцитов кроликов

Был проведён анализ образцов крови кроликов для оценки влияния трития на высшие организмы, проведено сравнение с бактериальным биотестом. На Рисунке 10 представлены зависимости физиологической активности клеток от дозы трития для (А) интенсивности билюминесценции бактерий; (Б) фагоцитарной активности лейкоцитов крови кроликов.

Поглощённые дозы 0,01; 0,05; 0,14; 0,19; 0,30 и 0,34 мГр соответствовали 2, 8, 21, 29, 47 и 53 часам воздействия НТО на бактерии. Из Рисунка 10А видно, что зависимость включает активацию физиологической функции бактерий при малых дозах (0,05 и 0,14 мГр) и ее ингибирование при более высоких дозах (0,30 и 0,34 мГр). Такой тип реакции соответствует модели гормезиса [Jargin, 2018; Calabrese, 2019] и упоминался нами в разделах 3.1 и 3.2.

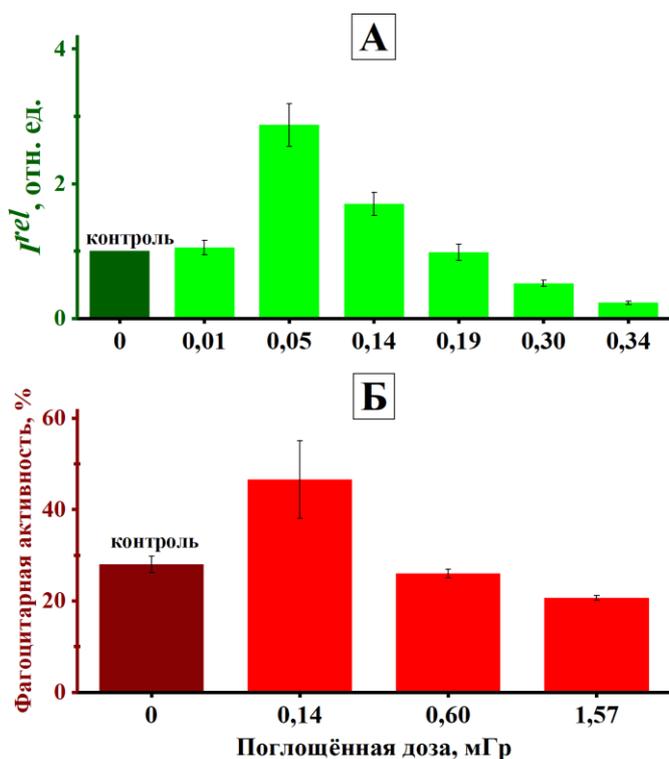


Рисунок 10 – Зависимость физиологической активности клеток от дозы трития:

(А) относительная интенсивность билюминесценции бактерий, I^{rel} ; удельная радиоактивность НТО равна 2 МБк/л;

(Б) фагоцитарная активность лейкоцитов крови кроликов; удельная радиоактивность НТО равна 1 МБк/л

Известно, что периферическая кровь животных чувствительна к воздействию факторов окружающей среды, включая ионизирующее излучение [Vikram et al., 2007; Moertl et al., 2020; Campbell and Grant, 2022], поэтому именно активность фагоцитов крови кроликов была выбрана в качестве показателя физиологической активности высшего организма. Была оценена фагоцитарная активность лейкоцитов в 75 образцах крови кроликов. На Рисунке 10Б представлена зависимость фагоцитарной активности лейкоцитов периферической крови от дозы трития. Поглощённые дозы 0,14; 0,6 и 1,57 мГр соответствовали 4, 10 и 20 дням воздействия НТО.

Воздействие трития при дозе 0,14 мГр увеличивало фагоцитарную активность на 70% ($p \leq 0,05$), более высокие дозы трития (0,6 и 1,57 мГр) снижали фагоцитарную активность лейкоцитов (Рисунок 10Б). Снижение фагоцитарной активности рассматривается как негативный результат радиационного воздействия, указывающий на ослабление иммунобиологической активности организма животного.

Таким образом, реакции бактерий и лейкоцитов кроликов на низкодозовое облучение тритием идентичны: они включают стадии активации и ингибирования и соответствуют модели гормезиса [Jargin, 2018; Calabrese, 2019; Agathokleous, 2025]. Однако дозовые диапазоны ответных реакций у кроликов и бактерий различаются: у бактерий реакция проявляется при значительно более низких дозах, чем у кроликов (Рисунок 10А–Б).

Важно отметить, что общие физиологические показатели кроликов (температура тела, частота дыхания, частота сердечных сокращений, масса тела и др.) находились в пределах физиологической нормы в условиях низкодозового воздействия трития.

3.3.2 Сравнение радиопротекторной активности гуминовых веществ в отношении клеток бактерий и лейкоцитов кроликов

Была изучена радиопротекторная активность ГВ в отношении клеток бактерий и лейкоцитов крови кроликов. На Рисунке 11А–Б представлена зависимость физиологической активности клеток от времени воздействия ГВ в присутствии трития.

Радиотоксичная (ингибирующая) доза НТО (0,34 мГр, Рисунок 10А) была выбрана для изучения радиопротекторной активности ГВ в бактериальной суспензии. Добавление ГВ в суспензии бактерий в присутствии трития увеличило интенсивность билюминесценции

(Рисунок 11А), приблизив ее к контрольному значению для бактерий, не подвергавшихся воздействию трития. Таким образом, мы наблюдали компенсаторный эффект ГВ, зависящий от времени, т.е. нейтрализацию эффектов НТО в бактериальных суспензиях. Аналогичные эффекты наблюдали ранее в предыдущих исследованиях [Rozhko et al., 2020].

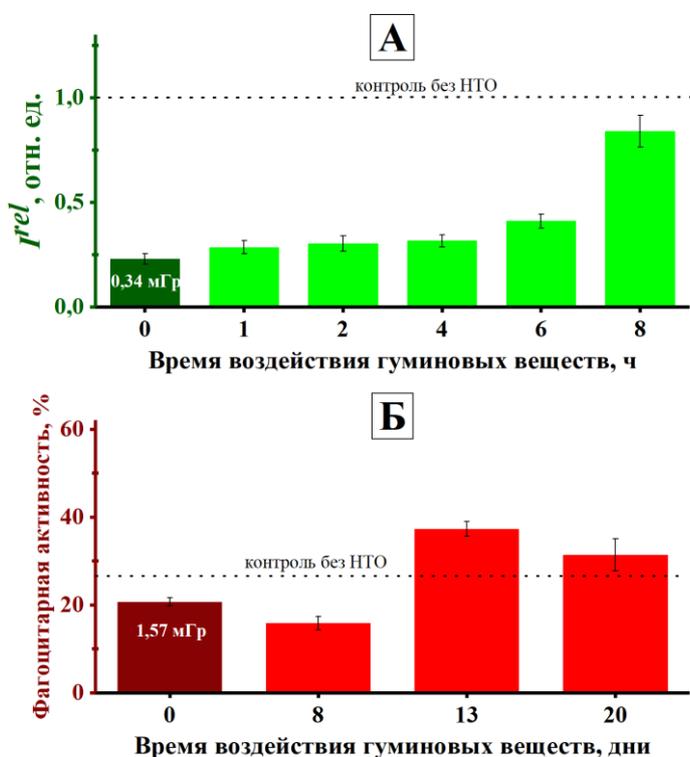


Рисунок 11 – Зависимость физиологической активности клеток от времени воздействия гуминовых веществ в присутствии трития: (А) относительная интенсивность билюминесценции бактерий, I^{rel} ; (Б) фагоцитарная активность лейкоцитов крови кроликов.

Концентрация гуминовых веществ – 10^{-3} М

Для изучения радиопротекторной активности ГВ для организмов кроликов, подвергшихся воздействию НТО, была выбрана токсичная доза 1,57 мГр, достоверно ($p \leq 0,05$) снизившая активность лейкоцитов по отношению к контролю без НТО на 26% (Рисунок 10Б). Кратковременное воздействие НТО+ГВ (8 дней) дополнительно снижало фагоцитарную активность лейкоцитов у кроликов (Рисунок 11Б) на 44% ($p \leq 0,001$). Только более длительное воздействие ГВ (13 и 20 дней) повышало фагоцитарную активность лейкоцитов (Рисунок 11Б), полностью нейтрализовало негативное влияние НТО, что свидетельствует о радиопротекторной активности ГВ в отношении данного клеточного процесса в организме кроликов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проанализированы биоэффекты радионуклидов альфа- и бета-типа (торий-232 и тритий) с использованием билюминесцентных тестовых систем – клеточной и ферментативной. Биоэффекты исследованы в отсутствие и в присутствии потенциальных модификаторов природного и искусственного происхождения – гуминовых веществ и фуллеренола. Проведен анализ изменений интенсивности билюминесценции бактерий, содержания АФК и ферментативной активности в клетках.

Полученные результаты позволили сделать следующие **выводы**:

1. Продемонстрировано, что нитрат тория-232 умеренно активизирует билюминесценцию бактерий и их ферментативной системы при низкодозовом воздействии ($< 10^{-5}$ Гр; $C_{Th} < 10^{-6}$ М) в физиологическом интервале кислотности среды ($pH > 5,0$). Токсического (ингибирующего) эффекта нитрата тория-232 не обнаружено. Анализ содержания АФК и скоростей ферментативной НАДН-зависимой реакции в присутствии тория-232 указывает на интенсификацию ферментативных редокс-процессов при воздействии тория-232 на бактерии;

2. Установлено, что в растворах тория-232 гуминовые вещества не модифицируют биолюминесцентный отклик бактерий и умеренно нейтрализуют воздействия тория-232 на ферменты. Фуллеренол не модифицирует биоэффекты тория на бактерии и их ферментативную систему, что вероятно, связано с малыми величинами этих биоэффектов (до 30–50%) при низких концентрациях растворенного тория-232;

3. Показано, что изменение интенсивности биолюминесценции бактерий (активация и ингибирование) при низкодозовом воздействии трития ($< 0,05$ Гр) сопровождается изменением содержания АФК в бактериальной суспензии. Выявлены высокие положительные корреляции между интенсивностью биолюминесценции и содержанием АФК, что указывает на подвижность баланса между производством и потреблением АФК бактериями в биолюминесцентном процессе;

4. Выявлена радиопротекторная активность гуминовых веществ и фуллеренола в растворах бета-излучающего радионуклида трития: эти соединения уменьшили отклонения интенсивности биолюминесценции бактерий и уровня АФК от контроля, как в случае активации, так и случае ингибирования;

5. Показано, что изменения интенсивности биолюминесценции бактерий и фагоцитарной активности лейкоцитов кроликов в условиях низкодозового воздействия трития идентичны и соответствуют модели гормезиса. Гуминовые вещества нейтрализуют ингибирующие воздействия трития на клетки крови кроликов и бактерий.

Таким образом, полученные данные подтверждают перспективность использования люминесцентного бактериального биотеста для оценки радиационных рисков и радиомодифицирующей активности биоактивных соединений. Люминесцентные бактерии могут использоваться в качестве экспресс-биотеста для оценки радиоактивного воздействия на клеточные процессы в высших организмах, а также радиопротекторной активности биологически активных веществ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Список статей, опубликованных автором по теме диссертации:

1. Rozhko, T. V. Humic Substances Mitigate the Impact of Tritium on Luminous Marine Bacteria. Involvement of Reactive Oxygen Species / T. V. Rozhko, **O. V. Kolesnik**, G. A. Badun, D. I. Stom, N. S. Kudryasheva // International Journal of Molecular Sciences. – 2020. – Vol. 21, Iss. 18. – P. 6783.

2. **Kolesnik, O. V.** Development of Cellular and Enzymatic Bioluminescent Assay Systems to Study Low-Dose Effects of Thorium / **O. V. Kolesnik**, T. V. Rozhko, M. A. Lapina, V. S. Solovyev, A. S. Sachkova, N. S. Kudryasheva // Bioengineering. – 2021. – Vol. 8, Iss. 12. – P. 194.

3. **Kolesnik O. V.** Marine Bacteria under Low-Intensity Radioactive Exposure: Model Experiments / **O. V. Kolesnik**, T. V. Rozhko, N. S. Kudryasheva // International Journal of Molecular Sciences. – 2023. – Vol. 24, Iss. 1. – P. 410.

4. Рожко, Т. В. Воздействие тория-232 на биолюминесцентную ферментативную систему и радиопротекторная активность гуминовых веществ / Т. В. Рожко, **О. В. Колесник**, А. С. Сачкова, Н. Ю. Романова, Д. И. Стом, Н. С. Кудряшева // Биофизика. – 2024. – Т. 69, №3. – С. 444–454. (на английском: Rozhko, T. V. The Effects of Thorium-232 on the Bioluminescent Enzymatic System and Radioprotective Activity of Humic Substances / T. V. Rozhko, **O. V. Kolesnik**, A. S. Sachkova, N. Yu. Romanova, D. I. Stom, N. S. Kudryasheva // Biophysics. – 2024. – Vol. 69. – P. 370-379)

5. **Kolesnik, O. V.** Radioprotective Properties of Fullereneol: Cellular, Biochemical and Physicochemical Approaches / **O. V. Kolesnik**, A. S. Grabovoy, G. A. Badun, G. N. Churilov, N. S. Kudryasheva // Eurasian Journal of Chemistry. – 2024. – Vol. 29, Iss. 3. – P. 72-81.

Материалы конференций, входящие в РИНЦ:

1. **Колесник, О. В.** Радиопротекторные свойства гуминовых веществ в растворах бета-излучающего радионуклида трития / **О. В. Колесник**, Т. В. Рожко, Г. А. Бадун, Н. С.

Кудряшева // Международная сателлитная конференция «Экологический мониторинг: методы и подходы» и XX Международный симпозиум «Сложные системы в экстремальных условиях» : материалы конференции / Сиб. федер. ун-т. – Красноярск, 2021. – С. 115-116.

2. Соловьёв, В. С. Гуминовые вещества как радиопротекторы. Биолюминесцентный мониторинг / В. С. Соловьёв, **О. В. Колесник**, А. С. Сачкова // Шаг в будущее: результаты научных исследований: Всероссийский конкурс научно-исследовательских проектов студентов, аспирантов и молодых ученых / Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина. – Елец, 2021. – С. 146-155.

3. Соловьёв, В. С. Снижение радиационной токсичности гуминовыми веществами. Биолюминесцентный мониторинг / В. С. Соловьёв, М. А. Лапина, **О. В. Колесник**, Е. С. Ковель // XXII Международная научно-практическая конференция студентов и молодых ученых имени выдающихся химиков Л.П. Кулёва и Н.М. Кижнера, посвященной 125-летию со дня основания Томского политехнического университета: материалы конференции / Томский политехнический университет. – Томск, 2021. – С. 157-158.

4. **Колесник, О. В.** Изучение воздействия Th-232 на биолюминесцентные клеточные системы. Роль активных форм кислорода / **О. В. Колесник**, Т. В. Рожко, А. С. Сачкова, Н. С. Кудряшева // X Международная конференция молодых учёных: биоинформатиков, биотехнологов, биофизиков, вирусологов и молекулярных биологов: материалы конференции / АНО «Инновационных центр Кольцово». – Новосибирск, 2023. – С. 345-346.

5. Грабовой, А. С. Изучение радиопротекторных свойств фуллеренола C₆₀,70 с помощью бактериального люминесцентного биотеста / А. С. Грабовой, **О. В. Колесник**, Н. С. Кудряшева // X Международная конференция молодых учёных: биоинформатиков, биотехнологов, биофизиков, вирусологов и молекулярных биологов: материалы конференции / АНО «Инновационных центр Кольцово». – Новосибирск, 2023. – С. 320-321.

6. **Колесник, О. В.** Мониторинг радиопротекторных свойств гуминовых веществ и фуллеренола C₆₀,70 с помощью биолюминесцентных бактерий / **О. В. Колесник**, А. С. Грабовой, Т. В. Рожко, Н. С. Кудряшева // Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность»: материалы конференции / ИВЦ Минфина. – Минск, 2023. – С. 129-131.

7. Рожко, Т. В. Воздействие тория на бактериальную биолюминесценцию / Т. В. Рожко, **О. В. Колесник**, Н. С. Кудряшева // Международная научная конференция «Радиобиология и экологическая безопасность»: материалы конференции / ИВЦ Минфина. – Минск, 2023. – С. 129-131.

8. Семенова, А. А. Воздействие нитрата тория на интенсивность биолюминесценции двух сопряженных реакций, катализируемых бактериальными ферментами / А. А. Семенова, В. В. Медведев, **О. В. Колесник**, А. С. Сачкова // Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-28): материалы конференции / АСФ России. – Новосибирск, 2024. – С. 213-214.

9. Грабовой, А. С. Использование бактериального и ферментативного люминесцентного биотестов для характеристики радиопротекторных свойств фуллеренола C₆₀,70 / А. С. Грабовой, **О. В. Колесник**, Н. С. Кудряшева // Двадцать восьмая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых учёных (ВНКСФ-28) : материалы конференции / АСФ. – Новосибирск, 2024. – С. 202-203.

10. Семенова, А. А. Выявление нейтрализующего эффекта гуминовых веществ и фуллеренолов в условиях низкодозового воздействия тория-232. Биолюминесцентный мониторинг / А. А. Семенова, **О. В. Колесник** // К вершинам науки: сборник научных статей по результатам Всероссийского конкурса / ФГБОУ ВО «Елецкий государственный университет им. И.А. Бунина». – Елец, 2024. – С. 191.