

На правах рукописи

ПАРАСКИВ АРТЕМ АЛЕКСЕЕВИЧ

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ САМООЧИЩЕНИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД В
ОТНОШЕНИИ РАДИОИЗОТОПОВ ПЛУТОНИЯ $^{239+240}\text{Pu}$ В ПРИБРЕЖНЫХ
МОРСКИХ АКВАТОРИЯХ**

Специальность – 1.5.16 Гидробиология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Севастополь – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» (ФИЦ ИнБЮМ), в отделе радиационной и химической биологии

Научный руководитель: кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела радиационной и химической биологии ФИЦ ИнБЮМ Терещенко Наталия Николаевна

Официальные оппоненты:

Карпенко Евгений Игоревич – доктор биологических наук, директор, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт радиологии и агроэкологии», г. Обнинск

Кузьменкова Наталья Викторовна – кандидат географических наук, старший научный сотрудник кафедры радиохимии химического факультета, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Мурманский морской биологический институт РАН», г. Мурманск

Защита состоится 18 октября 2023 года в 14.00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.221.01 (Д900.009.01) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральный исследовательский центр «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» по адресу: 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2; телефон: +7(8692)54-06-49; e-mail: dissovet@ibss-ras.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН» по адресу: 299011, Россия, г. Севастополь, пр. Нахимова, 2, и на сайте по адресу: <https://ibss-ras.ru/science/dissertation-council-24-1-221-01/announcement/2271/>

Автореферат разослан « ___ » _____ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат биологических наук

Поспелова Наталья Валериевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Среди ряда важных научно-практических направлений в гидробиологии особое место занимает проблема исследования поведения техногенных веществ и их взаимодействия с различными компонентами в водных экосистемах, выявление ведущих факторов и процессов, определяющих миграцию и перераспределение техногенных веществ в экосистеме. Эти процессы определяют интенсивность самоочищения вод и формирование качества водной среды, влияют на уровень воздействия загрязнителей на биоту (Поликарпов и Егоров, 1986; Израэль и Цыбань, 1989; Алимов, 2000; Остроумов, 2004; Совга и др., 2017; Егоров и др., 2018; Егоров, 2019).

Одной из составляющих техногенных веществ, поступающих в природные экосистемы, являются антропогенные радиоактивные вещества (Надытко, 2003; WOMARS, 2005). К экологически важным техногенным радионуклидам относятся радиоизотопы плутония $^{239+240}\text{Pu}$, широко применяемые в ядерных технологиях и обладающие высокой радиотоксичностью (Пути миграции..., 1999; Надытко, 2003; WOMARS, 2005; Радиоэкологический отклик..., 2008).

В Черном море уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ изучали после аварии на Чернобыльской АЭС в воде и донных отложениях в западной глубоководной области моря, его южной части, северо-западном шельфе и у северо-восточного побережья Кавказа (Polikarpov et al., 1991; Sanchez et al., 1991; Buessler and Livingston, 1996; Gulin et al., 2002; Радиоэкологический отклик..., 2008; Tereshchenko et al., 2018; Проскурнин и др., 2018). Есть немногочисленные данные о $^{239+240}\text{Pu}$ в гидробионтах из прибрежных районов Крыма и Кавказа (Marine Environmental Assessment..., 2004; Терещенко, 2013; Tereshchenko et al., 2014). Также была показана важная роль седиментационных процессов для самоочищения вод от загрязнителей (Егоров и др., 2013; Егоров и др., 2018). В рамках настоящей работы исследования проводили в Севастопольской бухте – прибрежной полузакрытой морской акватории, которая относится к акваториям повышенного экологического риска (Иванов и др., 2006; Егоров и др., 2018; Орехова и Вареник, 2018). В Севастопольской бухте ранее была изучена только удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях в верхнем 0–5 см слое (Терещенко и др., 2013) и на основе этих данных оценены среднегодовые седиментационные потоки плутония в донные отложения в период 2003–2012 гг. (Егоров и др., 2013). Однако до настоящего времени задачи по комплексному изучению $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольской бухте во всех основных компонентах морской экосистемы и процессы формирования качества вод бухты в отношении плутония $^{239+240}\text{Pu}$ еще не нашли своего решения.

Цель и задачи исследования. Целью работы было определение процессов формирования самоочищения морских природных вод в отношении техногенных радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ как результата их взаимодействия с биотическими и абиотическими компонентами в прибрежной морской акватории на примере Севастопольской бухты с учетом ее районирования.

В ходе исследования решали следующие задачи:

1. Определить современные уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в абиотических и основных биотических компонентах экосистемы и взвешенном веществе в Севастопольской бухте с учетом ее районирования.
2. Оценить аккумулирующую способность биотических и абиотических компонентов и взвешенного вещества в отношении $^{239+240}\text{Pu}$, определить тип биогеохимического поведения плутония в бухте.
3. Оценить уровень биологического влияния ионизирующего излучения от $^{239+240}\text{Pu}$ через дозовые нагрузки для гидробионтов в Севастопольской бухте, рассчитать региональные контрольные уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях бухты.
4. Охарактеризовать параметры процессов осадконакопления в экосистеме Севастопольской бухты на основе радиотрассерной геохронологии загрязнения донных отложений радиоизотопами плутония в до- и постчернобыльский период с учетом ее районирования.
5. Получить количественные оценки биотического и абиотического потоков перераспределения и миграции $^{239+240}\text{Pu}$ из водных масс в Севастопольской бухте для выявления ведущих процессов самоочищения вод бухты от радиоизотопов плутония.

Научная новизна. Впервые в прибрежных морских акваториях на примере Севастопольской бухты проведены комплексные исследования взаимодействия $^{239+240}\text{Pu}$ с биотическими и абиотическими компонентами и выполнена количественная оценка их аккумулирующей способности в отношении плутония, определен биогеохимический тип его поведения в Севастопольской бухте.

Определены региональные контрольные уровни $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях в Севастопольской бухте, как критерий обеспечения экологической радиационной безопасности морской биоты.

На основе ретроспективного мониторинга определено изменение потоков биогеохимической седиментации $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольской бухте с учетом ее районирования в до- и постчернобыльский период (1962–2020 гг.) На примере Севастопольской бухты для прибрежных морских экосистем Черного моря проведена оценка вклада основных потоков перераспределения и выноса

радиоизотопов плутония в самоочищение вод бухты и в качестве ведущего выделен биогеохимический поток седиментации взвешенного вещества.

Теоретическая и практическая значимость. Полученные результаты расширяют понимание фундаментальных закономерностей, лежащих в основе процессов перераспределения $^{239+240}\text{Pu}$ в прибрежных морских экосистемах, определяющих интенсивность биогеохимического самоочищения водных масс от плутония.

С учетом региональных параметров проведены расчеты дозовых нагрузок на биоту. Рекомендованы гидробионты-индикаторы для проведения мониторинговых исследований в отношении радиоизотопов плутония в экосистемах Черного моря: красные макроводоросли *Phyllophora* sp., бурые макроводоросли *Cystoseira* sp., двустворчатый моллюск *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) и бентосная рыба *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758).

Показано, что определение количественных характеристик процессов осадконакопления в бухте на масштабе нескольких десятилетий радиотрассерным методом с использованием радиоизотопов плутония позволяет оценить влияние гидротехнических сооружений в бухте или в ее водосборном бассейне через изменение ее водного режима на процессы самоочищения водных масс.

Результаты данной работы могут быть использованы для формирования научно-обоснованной базы экологического нормирования поступления $^{239+240}\text{Pu}$ в морскую среду прибрежных акваторий, а также поступления других консервативных веществ-загрязнителей с идентичным плутонию типом биогеохимического поведения, их элиминации из водных масс в результате природных процессов, что важно для принятия решений о контрмерах в случае аварий. Определены контрольные уровни $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях Севастопольской бухты.

Методология и методы исследования. В качестве основной методологии работы был применен целенаправленный мониторинг радиоизотопов плутония в биотических и абиотических компонентах прибрежной морской акватории Севастопольской бухты для дальнейшей характеристики взаимодействия $^{239+240}\text{Pu}$ с этими компонентами и выявления значения этого взаимодействия в формировании самоочищения вод в отношении $^{239+240}\text{Pu}$. Также в работе использовалась методология оценки самоочистительной способности вод и выявления ведущих процессов формирования качества природных вод посредством потоков элиминации плутония из морских вод.

Использован радиохимический метод выделения плутония из проб природных объектов, метод альфа-спектрометрии, методы статистической обработки данных.

Использованы методы расчета радиоэкологических параметров: коэффициентов накопления, фактора радиоемкости, удельных запасов и основных удельных потоков элиминации плутония из водных масс. Для определения основных параметров процессов осадконакопления применен радиотрассерный метод геохронологической датировки донных отложений. Для расчета дозовых нагрузок использован программный комплекс ERICA Assessment Tool. Применена разработанная Росгидрометом методология расчета контрольных уровней удельной активности радиоизотопов в воде и донных отложениях морских экосистем, обеспечивающих безопасность морских организмов.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основной вклад в самоочищение вод прибрежных морских акваторий в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ вносит биогеохимический седиментационный поток взвешенного вещества в донные отложения.

2. Аккумулирующая способность биотических компонентов в прибрежных морских акваториях в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ уменьшается с повышением трофического уровня.

3. В современный период мощности доз от ионизирующего излучения $^{239+240}\text{Pu}$ на биоту в прибрежных морских акваториях не достигают значений критерия экологически безопасного радиационного воздействия.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов обеспечена применением современных научных методов исследований, достаточным объемом натуральных данных, использования аттестованного измерительного оборудования и эталонных источников ионизирующего излучения. Проведенные исследования были поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований в рамках проектов № 20-45-920004 и № 20-35-90041, результаты которых успешно прошли экспертную оценку, как и разделы в отчетах по гостемам ФИЦ ИнБЮМ №1001-2014-0013 (2015–2017 гг.) и № 121031500515-8 (2018–2023 гг.). Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, были апробированы на 14 научных мероприятиях, включая международные.

Личный вклад автора. Автором проведен анализ литературных источников по проблеме диссертации, на основании которого были сформулированы цель и задачи исследования, разработана стратегия отбора проб природных образцов и определения количественных параметров отдельных процессов в бухте. В период 2015–2021 гг. автор принял участие в 20 прибрежных морских экспедициях, в которых совместно с коллегами из отдела радиационной и химической биологии (ОРХБ) непосредственно осуществлял отбор проб гидробионтов, поверхностной

воды, кернов донных отложений и взвешенного вещества. Радиохимическая обработка проб природных образцов, измерения, расчет удельной активности ^{238,239,240}Pu и статистическая обработка данных осуществлялись автором лично. Автор проводил подготовку и написание статей, материалов конференций и докладов как лично, так и в соавторстве. Текст диссертационной работы написан самостоятельно лично соискателем.

Публикации по теме исследования. Всего по теме исследования опубликована 21 работа, из них: статей в рецензируемых научных журналах – 6, глава в коллективной монографии – 1, статьи в сборниках материалов конференций – 7, в том числе реферируемых в SCOPUS – 1, тезисы докладов конференций – 7. Требованиям ВАК по специальности 1.5.16 «Гидробиология» удовлетворяют 4 работы в рецензируемых научных изданиях, также входящих в международные наукометрические базы РИНЦ, WoS и SCOPUS.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти разделов, заключения, выводов и списка литературы. Она изложена на 194 страницах, содержит 23 таблицы и 37 рисунков. Список литературы включает 221 источник, в том числе 96 на иностранных языках.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность своему научному руководителю – к.б.н. Н.Н. Терещенко за многолетнее руководство и помощь на протяжении всех этапов работы. Особая благодарность В.Ю. Проскурнину за всестороннюю помощь на всех этапах работы. Глубокая признательность академику РАН, д.б.н., профессору В.Н. Егорову, к.б.н. Н.Ю. Мирзоевой, к.б.н. Л.В. Малаховой, к.б.н. Т.В. Малаховой за ценные рекомендации и консультации. Большая благодарность коллегам из ОРХБ за помощь в экспедиционных работах и обработке проб: И.Н. Мосейченко, И.Г. Сидорову, М.О. Вахрушеву и О.Д. Чужиковой-Проскурниной. Автор также выражает благодарность д.б.н. А.В. Трапезникову (ИЭРиЖ УрО РАН), А.П. Платаеву (ИЭРиЖ УрО РАН) и М.С. Мельгунову (ИГиМ СО РАН) за плодотворное сотрудничество и помощь в измерении проб. Большая благодарность М.П. Кирину и В.В. Губанову за помощь в отборе проб воды, а также к.б.н. Н.А. Мильчаковой, к.б.н. В.В. Александрову, к.б.н. Е.Н. Скуратовской, к.б.н. Н.С. Кузьминовой за предоставление проб биоты, помощь в определении таксономической принадлежности гидробионтов и ценные рекомендации. Особая благодарность Российскому фонду фундаментальных исследований за предоставленную финансовую поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В разделе 1 обсуждаются основные природные процессы, определяющие самоочищение водных масс от загрязняющих веществ, дается краткая характеристика $^{239+240}\text{Pu}$ как техногенных дозообразующих радиоизотопов. Описаны основные источники и пути поступления радиоизотопов плутония в Черное море. Приводится обзор исследований касательно содержания плутония в биотических и абиотических компонентах Черного моря. Обсуждаются современные подходы к определению дозовых нагрузок и нормированию содержания радионуклидов в морских экосистемах. Сделан вывод о необходимости проведения комплексных исследований в прибрежных районах с целью выявления ведущих процессов, обеспечивающих самоочищение водных масс в отношении плутония. Для этого была выбрана Севастопольская бухта – полузакрытая прибрежная морская акватория, широко используемая в хозяйственной деятельности и отнесенная по степени антропогенной нагрузки к потенциально критическим зонам Черного моря.

В разделе 2 показаны районы отбора проб, обосновывается выбор объектов исследования, приводится объем исследуемого материала и краткое описание методов. Исследования проводили в период 2013–2021 гг. на 20 станциях: в Севастопольской бухте, акватории ее внешнего рейда и реки Черная, впадающей в верховье бухты (рис. 1). В рамках проведения исследований было принято районирование акватории Севастопольской бухты на четыре района-боксы по гидролого-гидрохимическим и морфометрическим характеристикам, а также степени загрязненности (Иванов и др., 2006; Стокозов, 2010).

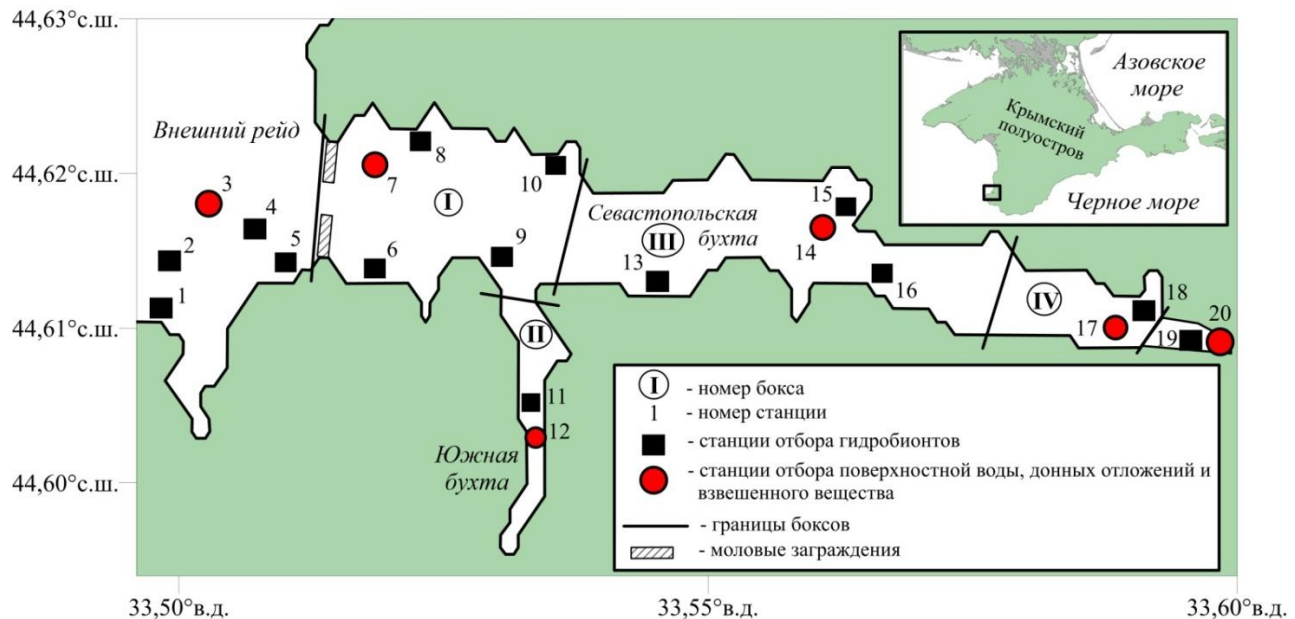


Рисунок 1 – Карта-схема станций отбора проб и деление Севастопольской бухты на районы-боксы

Осуществлялся сбор основных биотических и абиотических компонентов экосистемы: воды, взвешенного вещества, донных отложений и гидробионтов. Всего отобрано и обработано 204 пробы для определения удельной активности радиоизотопов плутония (39 пробы воды, 76 пробы гидробионтов, 89 проб донных отложений) и 68 проб для определения концентрации взвешенного вещества в воде.

Были изучены следующие гидробионты: макрофиты – *Cystoseira* sp., *Phyllophora* sp., *Cladophora* sp., *Ulva* sp., *Zostera* sp., *Ruppia* sp., моллюски – *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) и *Rapana venosa* (Valenciennes, 1846), зоопланктон – представители подкласса Copepoda, рыбы – *Scorpaena porcus* (Linnaeus, 1758), *Mullus barbatus ponticus* (Linnaeus, 1758), *Spicara flexuosa* (Rafinesque, 1810), *Trachurus mediterraneus* (Steindachner, 1868) и *Alosa immaculata* (Bennett, 1835), морские млекопитающие – *Phocoena phocoena relicta* (Abel, 1905). При оценке дозовых нагрузок на биоту были использованы литературные данные об аккумулярующей способности в отношении плутония таких групп биоты, как фитопланктон и ракообразные (на примере *Carcinus* sp.) (Wilson et al., 2009; Терещенко и др., 2013).

Определение удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ проводили после радиохимической обработки проб с последующей их альфа-спектрометрией (ORTEC) при использовании ^{242}Pu в качестве трассера (Методика измерений..., 2015). Измерительные работы проводили в отделе Радиационной и химической биологии Института биологии южных морей РАН (г. Севастополь), лаборатории Общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН (г. Заречный), а также в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии СО РАН (г. Новосибирск). При измерении проб в течение 6–10 суток минимально детектируемая активность составляла $0,01 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$ для проб воды и $0,1 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ для проб гидробионтов, донных отложений и взвешенного вещества. Статистическая обработка результатов проводилась стандартными в радиоэкологии и радиометрии методами (ISO 11929..., 2010), ошибка измерения приведена в виде одного стандартного отклонения ($\pm 1\sigma$).

Определяли основные радиоэкологические параметры в отношении плутония: коэффициенты накопления (K_H), фактор радиоемкости (F), удельные запасы ($Z_{уд}$), удельные потоки ($P_{уд}$) для количественной оценки аккумулярующей способности компонентов экосистемы и определения типа биогеохимического поведения плутония в водоеме (Радиоэкологический отклик..., 2008). В рамках настоящей работы ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ также использованы в качестве радиотрассеров процессов осадконакопления (Радиоэкологический отклик..., 2008; Проскурнин и др., 2018).

Мощности доз на гидробионты оценивали с использованием современного программного комплекса ERICA Assessment Tool (Brown et al., 2008). Региональные контрольные уровни $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях рассчитывали руководствуясь рекомендательными документами Росгидромета (Р 52.18.852-2016; Р 52.18.873-2018).

Определение значимости взаимодействия плутония с абиотическими и биотическими компонентами экосистемы Севастопольской бухты и выявление основных процессов, обеспечивающих формирование самоочищения природных вод в отношении этих техногенных веществ, осуществляли посредством величин седиментационного, гидрологического и макробиотического потоков элиминации $^{239+240}\text{Pu}$, а также оценивали вклад радиоактивного распада в уменьшение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в морской воде (Егоров и др., 2018; Егоров, 2019).

В разделе 3 приведены результаты определения удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в биотических и абиотических компонентах, количественно оценена их аккумулирующая способность в отношении плутония. Проведен расчет дозовых нагрузок на гидробионты от ионизирующего излучения $^{239+240}\text{Pu}$, а также региональных контрольных уровней $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях бухты.

В подразделе 3.1 показано, что удельная активность ^{238}Pu была очень низкой и не превышала $0,33 \pm 0,11$ мБк·м⁻³, а в 9 пробах была ниже предела детектирования, поэтому далее обсуждается только удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$.

Для определения роли взвешенного вещества при распределении плутония в воде бухты определяли удельную активность $^{239+240}\text{Pu}$ в растворенной ($^{239+240}\text{Pu}_{\text{раств}}$), взвешенной ($^{239+240}\text{Pu}_{\text{взв}}$) и интегральной ($\sum^{239+240}\text{Pu}$) форме, а также концентрацию взвеси в воде.

В поверхностных водах в четырех боксах Севастопольской бухты величины удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ находились в диапазоне значений $1,04 \pm 0,43$ – $2,77 \pm 0,21$ мБк·м⁻³. В целом, полученные величины удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностных водах бухты были выше таковых, ранее определенных для глубоководной части Черного моря ($0,5$ – $0,7$ мБк·м⁻³) (Tereshchenko et al., 2018). На примере акватории внешнего рейда показано, что на протяжении 2019 г. и на протяжении 2021 г. в различные климатические сезоны не наблюдалось однонаправленных изменений величин удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в воде с учетом ошибки определения.

Среди всех исследованных районов, максимальное значение удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностной воде было определено (рис. 2а) для устьевой зоны р. Черная – $3,80 \pm 0,31$ мБк·м⁻³. Более высокие значения удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностных водах зоны смешения река–море (бокс 4 и устье реки

Черная) могут быть связаны с повышенным содержанием взвешенного вещества в этой части акватории (рис. 2а). Данное предположение подтверждается наличием корреляционной связи между удельной активностью $\sum^{239+240}\text{Pu}$ и концентрацией взвешенного вещества в воде (рис. 2б). Парный коэффициент корреляции Пирсона для полученной зависимости составил 0,72.

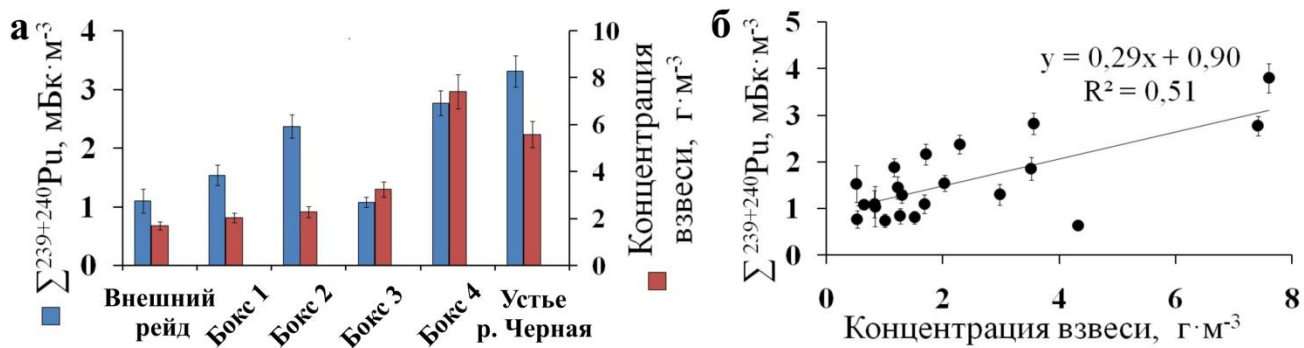


Рисунок 2 – Максимальные значения удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ и концентрация взвеси в поверхностной воде в 2019–2021 гг. (а), а также зависимость $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в воде от концентрации взвеси (б)

Показано, что в верховье бухты более высокие значения концентрации взвеси были не эпизодическим фактом (рис. 3а). При этом наибольшие величины были отмечены для боксов 3 и 4 в весенний и летний периоды. Это может быть связано как с развитием планктонных организмов в это время года (Современное состояние..., 2003; Лопухина, 2005), так и с более интенсивным литогенным стоком, привносимым рекой Черная, особенно во время паводка (Иванов и др., 2006).

Оценка удельной активности $\sum^{239+240}\text{Pu}$ в отдельных составляющих взвеси показала, что доля $\sum^{239+240}\text{Pu}$ на биогенной и литогенной составляющей осадочного вещества отличалась в разных боксах (рис. 3б).

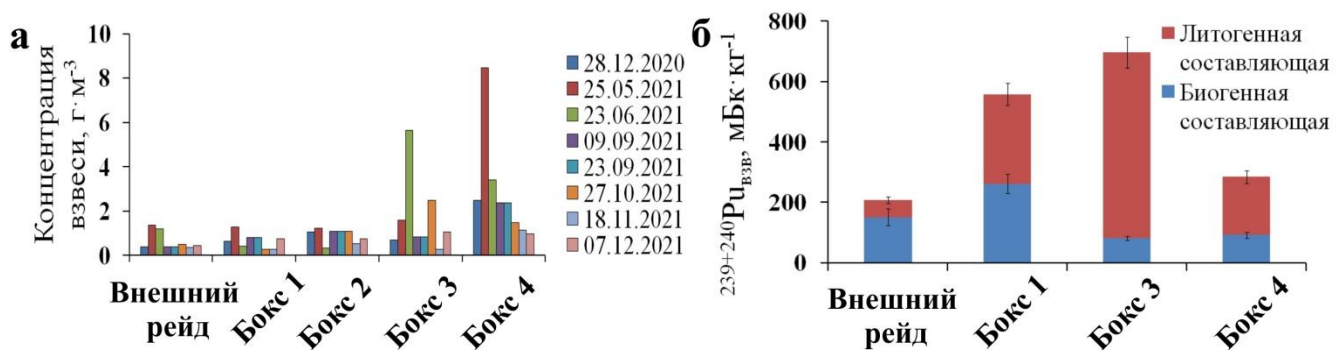


Рисунок 3 – Изменение концентрации взвеси в течение года в поверхностной воде районов исследования (а) и удельная активность $\sum^{239+240}\text{Pu}_{\text{взв}}$ на биогенной и литогенной составляющей осадочного вещества (б)

Следовательно, извлечение $^{239+240}\text{Pu}$, из морской воды посредством его выноса со взвесью в донные отложения в разных районах бухты связано с составом осадочного вещества. Так, в боксе 1 и на внешнем рейде в этот процесс более высокий вклад вносит биогенная составляющая осадочного вещества. В центральной части бухты и ее вершине (боксы 3 и 4) напротив, основную роль в элиминации $^{239+240}\text{Pu}$ играет литогенная составляющая, что обусловлено, по-видимому, твердым стоком реки Черная.

Для количественной оценки аккумулирующей способности были рассчитаны величины коэффициентов накопления. Полученные значения $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ взвешенным веществом ($3 \cdot 10^4 - 6 \cdot 10^5$) подтверждают выводы о значительной интенсивности взаимодействия плутония со взвесью и высоком вкладе взвешенных частиц в процессы самоочищения морских вод от $^{239+240}\text{Pu}$ (Merino et al., 2000; Wilson et al., 2009; Hirose, 2009; Lujaniene et al., 2012).

В подразделе 3.2 приводятся результаты определения $^{239+240}\text{Pu}$ в представителях референтных групп биоты: макрофитов, моллюсков, рыб и морских млекопитающих. Удельная активность ^{238}Pu в гидробионтах была ниже предела детектирования. Наибольшие величины $^{239+240}\text{Pu}$ были определены в красных (*Phyllophora* sp.) и бурых (*Cystoseira* sp.) водорослях, раковинах мидий (*M. galloprovincialis*) и бентосных рыбах (*S. porcus*) (рис. 4), как и $K_H(^{239+240}\text{Pu})$: для *Phyllophora* sp. – $7 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$, для *Cystoseira* sp. – $2 \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$, для раковин *M. galloprovincialis* – $7 \cdot 10^2 - 5 \cdot 10^4$, для *S. porcus* – $3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^3$.

Для макрофитов полученные результаты, по всей видимости, связаны с тем, что *Phyllophora* sp. и *Cystoseira* sp. – многолетние макроводоросли и способны вегетировать несколько лет, образуя новые части таллома на протяжении времени жизни. А активное развитие *Cladophora* sp., *Ulva* sp. и *Ceramium* sp. приходится лишь на весенне-летний сезон, затем они отмирают (Калугина-Гутник, 1975; Milchakova, 2011). Таким образом, однолетние водоросли обитали в воде с более низкими уровнями $^{239+240}\text{Pu}$.

Также, как известно, красные и бурые макроводоросли содержат в своем химическом составе агароид, альгиновые кислоты и фукоидан, являющиеся природными сорбентами радионуклидов и тяжелых металлов (Морская радиохемозкология..., 1984; Осовская и Приходько, 2020), что обуславливает более высокую аккумулирующую способность представителей данных родов макроводорослей.

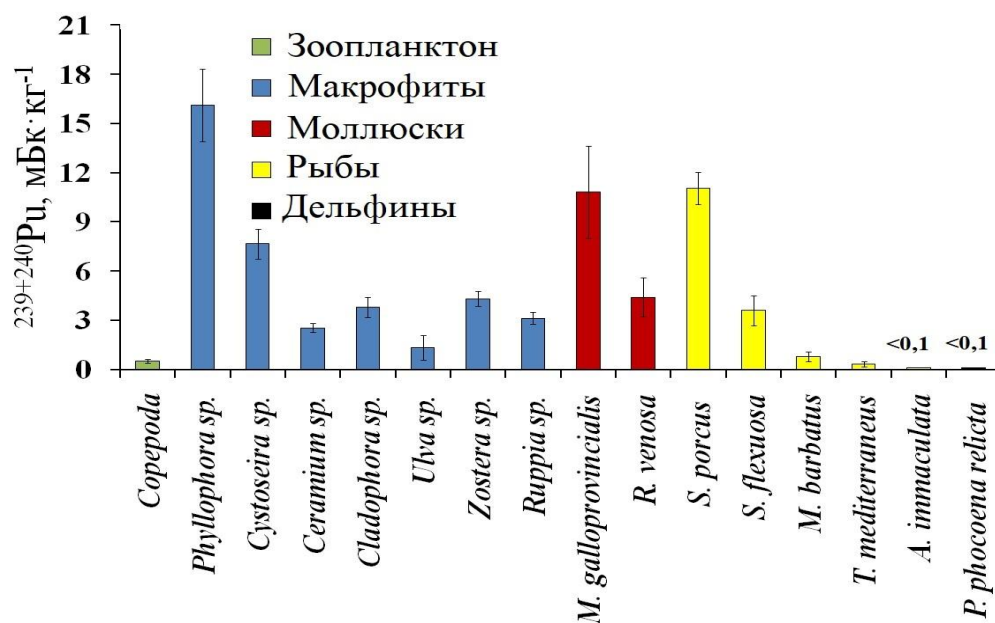


Рисунок 4 – Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в представителях биоты

Более низкая аккумулирующая способность многолетних морских трав в отношении плутония по сравнению с многолетними макроводорослями по всей видимости обусловлена меньшей удельной поверхностью их листовых пластин, в отличие от разветвленных талломов водорослей, и им свойственно корневое питание, как высшим растениям, для которых ранее были определены достаточно низкие величины $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ (Гудков и др., 2005; Молчанова и др., 2014).

Изучение $^{239+240}\text{Pu}$ в моллюсках показало, что для раковин *M. galloprovincialis* (моллюск-фильтратор) характерна более высокая аккумулирующая способность в сравнении с раковинами *R. venosa* (моллюск-хищник), что может обуславливаться особенностями питания изученных видов. Важно отметить, что для раковин мидий, обитавших в толще воды (на коллекторах марихозьяства), была определена более высокая аккумулирующая способность в отношении $^{239+240}\text{Pu}$, чем для таковых, обитавших на донных субстратах. Вероятно, это связано с различиями в условиях питания моллюсков. Так, было показано, что у обитающих в толще воды мидий более высокие скорости биологических процессов, по сравнению с мидиями, живущими на грунте (Супрунович и Макаров, 1990). Это связано с тем, что на коллекторах мидии распределены равномерно, и, несмотря на плотность посадки, каждая особь моллюска лучше омывается водой, и, как следствие, лучше обеспечивается пищей. Как результат, наблюдали более высокие показатели жизненных процессов у мидий, что может приводить к усилению процессов аккумуляции веществ из водной среды, в том числе $^{239+240}\text{Pu}$.

Для мидий, обитающих в Севастопольской бухте, была определена линейная зависимость между размерными характеристиками их раковин и удельной активностью $^{239+240}\text{Pu}$. Коэффициент корреляции для полученной зависимости составил 0,71, коэффициент детерминации – 0,51. Значимых различий в аккумулярующей способности $^{239+240}\text{Pu}$ у особей разного пола выявлено не было.

Установлено, что для бентосных рыб *S. porcus*, ведущих оседлый образ жизни, характерны более высокие значения удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ и $K_H(^{239+240}\text{Pu})$, чем для рыб *M. barbatus ponticus*, также обитающих у дна, однако мигрирующих на значительные расстояния. Пелаго-бентосные рыбы *S. flexuosa* также могут накапливать $^{239+240}\text{Pu}$ в значительных количествах, вероятно в силу своего широкого спектра питания: от мелких беспозвоночных во время обитания у дна, до молоди других рыб и микроводорослей во время обитания в толще воды (Болтачев и Карпова, 2012). В свою очередь, для рыб *T. mediterraneus* и *A. immaculata*, обитающих в пелагиали и в процессе своей жизнедеятельности мигрирующих на значительные расстояния, была характерна самая низкая аккумулярующая способность в отношении радиоизотопов плутония. Будучи хищными, данные виды в основном питаются молодью других рыб и зоопланктоном, и, не смотря на продолжительность жизни, достигающую 10–14 лет, практически не накапливают $^{239+240}\text{Pu}$. Впервые для черноморских рыб на примере *S. porcus* показано, что большая часть (более 50 %) $^{239+240}\text{Pu}$ в бентосных рыбах аккумуляруется в жабрах, приблизительно одинаковые количества аккумуляруют кости и печень (20,1 и 20,3 %, соответственно), и лишь небольшая часть плутония (6,2 %) накапливается в мышцах.

В качестве морских млекопитающих в настоящей работе была изучена самка дельфина азовки *P. phocoena relicta*, являющихся представителями верхнего звена трофической цепи в Черном море (Логоминова и др., 2018). По результатам изучения таких органов и тканей *P. phocoena relicta*, как печень, мышцы, сердце и жир, показано, что уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в них были ниже предела детектирования. Следовательно, при современных уровнях $^{239+240}\text{Pu}$ в воде Черного моря, несмотря на достаточно высокую аккумулярующую способность более низких звеньев пищевой цепи, радиоизотопы плутония не накапливаются в определяемых количествах в представителях верхнего звена трофической цепи.

В подразделе 3.3 приведены результаты определения значений мощности дозы, формируемой в представителях биоты Севастопольской бухты в результате действия альфа-излучения $^{239+240}\text{Pu}$. Установлено, что величина мощности доз в гидробионтах бухты лежала в диапазоне $2,8 \cdot 10^{-4} - 1,5 \cdot 10^{-8}$ мГр·сут⁻¹, т. е. значения критерия экологически безопасного радиационного воздействия (0,1 мГр·сут⁻¹ для

млекопитающих и позвоночных животных и $1 \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$ для растений и беспозвоночных животных (ICRP, 2008; Р 52.18.820-2015)) не достигались. Сопоставление данных со шкалой концептуальной модели Г.Г. Поликарпова показало, что мощности дозы от $^{239+240}\text{Pu}$ для гидробионтов в период 2013–2021 гг. не превышали таковые, характерные для зоны природного фона. Значения мощностей доз были использованы для расчета контрольных уровней $^{239+240}\text{Pu}$.

В подразделе 3.4 приведены данные по удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в 0–5 см слое донных отложений. Удельная активность ^{238}Pu в 0–5 см слое осадков изучаемых районов находилась в диапазоне от 10 ± 3 до $37 \pm 16 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$, в то время как удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ достигала $765 \pm 53 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (рис. 5).

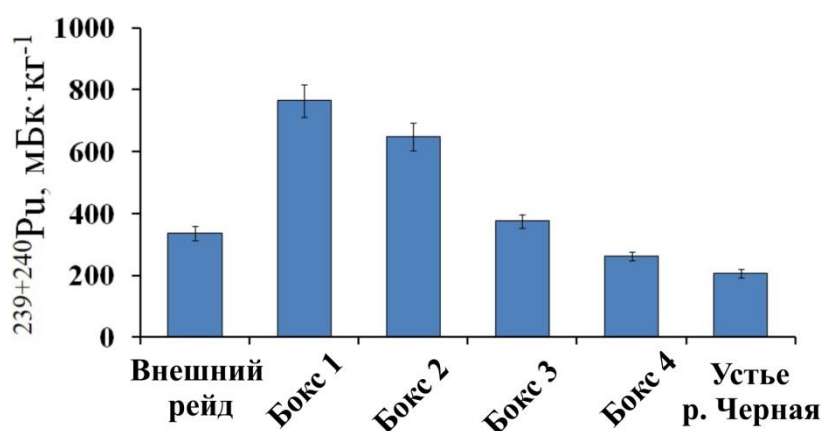


Рисунок 5 – Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном 0–5 см слое донных отложений в районах исследования в 2019–2020 гг.

При сравнении данных с результатами исследований 2007–2011 гг. (удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном слое осадков бухты находилась в диапазоне значений от 110 ± 20 до $993 \pm 90 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$ (Терещенко и др., 2013)) показано, что в последнее десятилетие удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в 0–5 см слое донных отложений бухты в рамках погрешности осталась практически на том же уровне. Это может указывать на относительное постоянство потока вторичного поступления рассеянного плутония в воды бухты и его элиминации из вод в донные отложения в последнее десятилетие.

Определены величины $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ для донных отложений, и показана их высокая аккумулирующая способность, характеризующая степень их взаимодействия с $^{239+240}\text{Pu}$: $7 \cdot 10^4 - 3 \cdot 10^5$. Вероятно, различия значений удельной активности и $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ для донных осадков в районах исследования обусловлены отличиями в концентрации, происхождении и гранулометрическом составе осадочного вещества, характерного для конкретной акватории.

В подразделе 3.5 приводится обобщенная характеристика аккумулирующей способности биотических и абиотических компонентов Севастопольской бухты в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ (рис. 6).

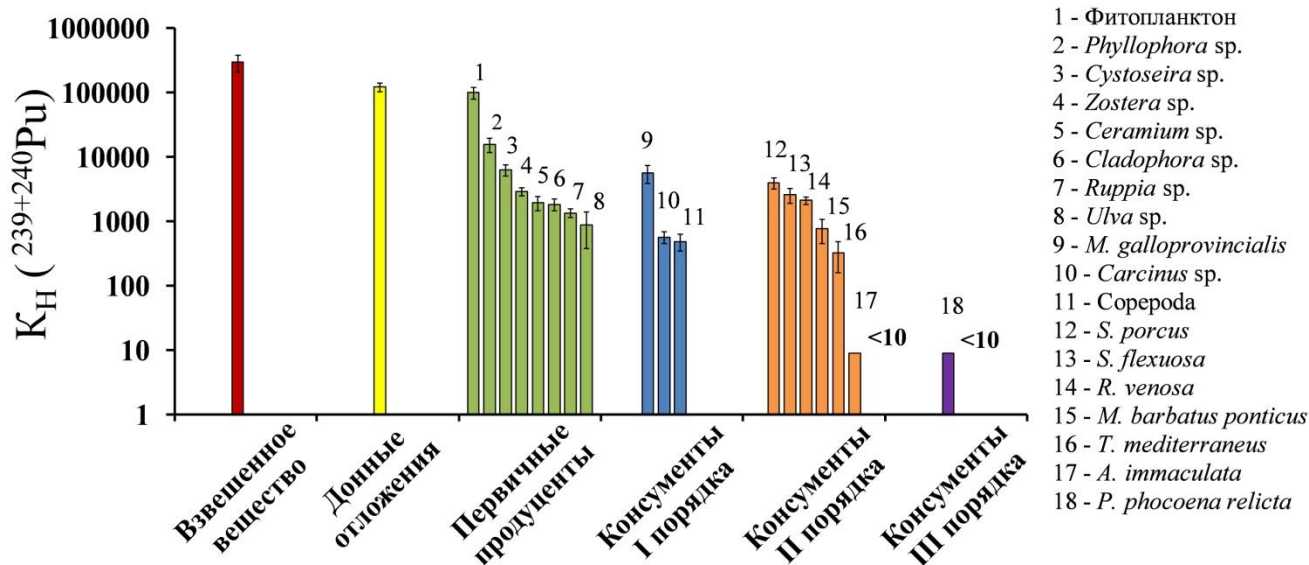


Рисунок 6 – Величины $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ для биоты, донных отложений и взвеси

Показано, что в Севастопольской бухте взвешенное вещество и донные отложения обладают наибольшими $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ – $n \cdot 10^5$. Значения коэффициентов накопления для гидробионтов были ниже, чем для донных отложений и взвеси, но все же достаточно высокими. Поэтому в морской экосистеме происходит усиление потока $^{239+240}\text{Pu}$ из воды в организмы гидробионтов и его накопление обитателями бухты до уровней концентраций, значительно превышающих таковые в воде, согласно величине $K_H(^{239+240}\text{Pu})$, т.е. до концентраций в 100–100000 раз выше, чем в воде. Но с повышением уровня организации гидробионтов $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ уменьшаются и это приводит к снижению перехода плутония между звеньями трофической цепи от низших звеньев к высшим.

Таким образом, установлено, что хотя плутоний не является биологически активным элементом, его накопление гидробионтами характеризуется значительными величинами K_H и в прибрежных высокопродуктивных акваториях при высокой численности и биомассе биотические компоненты могут оказывать определенное влияние на самоочищение вод от плутония.

В подразделе 3.6 приведены результаты расчетов контрольных уровней $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях, которые на практике могут служить более удобными параметрами нормирования и оценки экологического состояния акваторий, по сравнению с величинами мощностей доз. Гидробионты с самой

высокой аккумуляционной способностью – *Phyllophora* sp., *Cystoseira* sp., *M. galloprovincialis* и *S. porcus* – рекомендованы в качестве гидробионтов-индикаторов и референтных объектов биоты при проведении мониторинговых исследований в отношении радиоизотопов плутония в черноморских экосистемах.

В качестве контрольного уровня, рассчитанному по экологическому, радиационному и радиационно-гигиеническому критериям (Р 52.18.852-2016; Р 52.18.873-2018), для Севастопольской бухты определены удельные активности $^{239+240}\text{Pu}$, равные $6,1 \cdot 10^{-3} \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ для воды и $0,7 \cdot 10^3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ для донных отложений.

В разделе 4 для геохронологической датировки донных отложений приведены результаты изучения вертикального распределения ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в осадках. На их основе количественно охарактеризованы такие параметры, как скорость осадконакопления (SR) и абсолютные массы донных осадков (MAR), играющие важную роль в самоочищении водных масс в экосистеме бухты с учетом ее районирования в до- и постчернобыльский периоды.

На рис. 7 приведен один из профилей – для бокса 4. Максимум ^{238}Pu определен в слое 10–12 см (рис. 7а). На профиле $^{239+240}\text{Pu}$ были отмечены два пика – в слоях 10–12 и 28–30 см. В связи с повышенным содержанием ^{238}Pu слое 10–12 см наблюдалось на порядок величин более высокое, по сравнению с остальными слоями осадка, отношение активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, равное $0,32 \pm 0,02$ (рис. 7б).

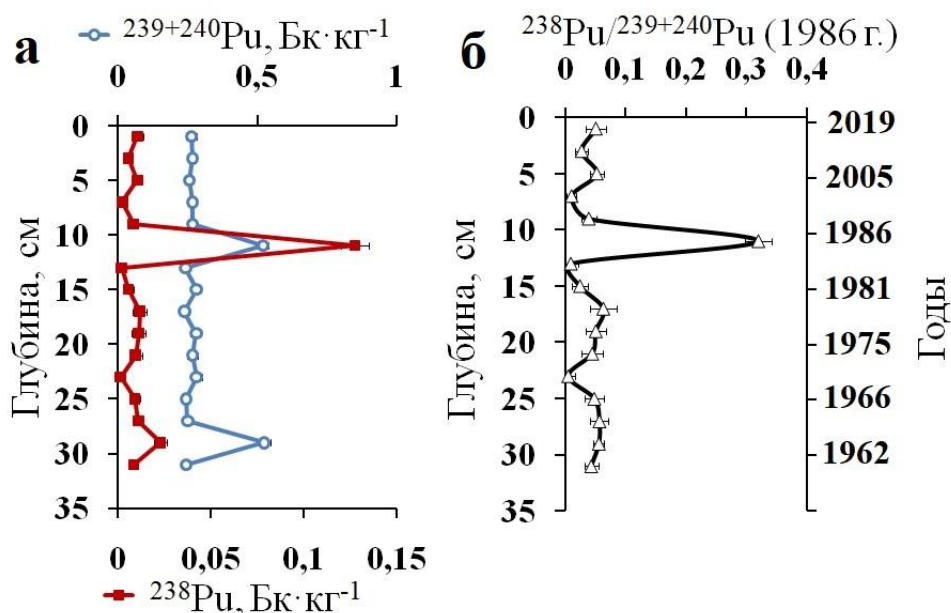


Рисунок 7 – Вертикальное распределение ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ (а) и $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ (б) в донных отложениях бокса 4 Севастопольской бухты в 2019 г.

Такая картина согласуется с историей поступления плутония в Черное море, а именно с максимумом радиоактивных выпадений после аварии на ЧАЭС в 1986 г. В них $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ было на порядок величин больше, чем для глобальных выпадений (с максимумом в 1962 г.) после мощных испытаний ядерного оружия в открытых средах (Радиоэкологический отклик..., 2008). Поэтому, максимумы удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в слое осадка 10–12 см отнесены к 1986 году. Слой 28–30 см со вторым максимумом удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ и практически на порядок величин меньшим значением $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ был датирован 1962 годом.

Проведение подобного анализа для кернов осадка из других боксов бухты и ее внешнего рейда позволило количественно охарактеризовать параметры процессов осадконакопления за два временных периода: до и после аварии на ЧАЭС (табл. 1). Для бокса 2 определение SR и MAR в дочернобыльский период не выполнялось вследствие недостаточной глубины исследованного керна (21 см).

Таблица 1 – Изменение SR и MAR в до- и постчернобыльский период

Район исследования	Период, годы	SR, мм·год ⁻¹	MAR, г·м ⁻² ·год ⁻¹
Бокс 1	1962–1986	2,5	2163
	1986–2016	5,3	3892
Бокс 2	1962–1986	–*	–
	1986–2020	5,9	3450
Бокс 3	1962–1986	6,4	3358
	1986–2019	4,2	2238
Бокс 4	1962–1986	7,5	3895
	1986–2019	3,7	1679
Внешний рейд	1962–1986	5,0	4833
	1986–2019	4,8	4796
Глубоководная зона	1962–2013	0,8	54

Примечание: * – нет данных

Полученные данные по изменению SR и MAR в до- и постчернобыльский периоды в боксах 1, 3 и 4 свидетельствуют об антропогенном влиянии постройки гидротехнических сооружений в бухте и ее водосборном бассейне на процессы осадконакопления и самоочистительную способность вод бухты. В целом, определенные значения SR и MAR превышали таковые, полученные для западной

глубоководной части Черного моря (Проскурнин и др., 2018). Таким образом, показано, что процессы осадконакопления в прибрежных районах Черного моря происходят значительно более интенсивно. Этот факт свидетельствует о более высокой скорости самоочищения водных масс прибрежных акваторий в отношении $^{239+240}\text{Pu}$.

В разделе 5 приведены результаты расчетов запасов $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах экосистемы Севастопольской бухты, а также фактора радиоемкости донных отложений в отношении $^{239+240}\text{Pu}$. Проведена геохронологическая реконструкция седиментационных потоков $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в донные отложения различных районов бухты как количественной характеристики самоочищения вод. Количественно оценены гидрологический и макробиотический потоки выноса радиоизотопов плутония из водных масс бухты, и показан вклад радиоактивного распада в процесс самоочищения вод.

Получено, что более 99 % радиоизотопов плутония в экосистеме бухты сосредоточены в донных отложениях. Об этом свидетельствуют как величины удельных запасов $^{239+240}\text{Pu}$ в основных компонентах экосистемы бухты, так и величины фактора радиоемкости, которые составили более 99 % для донных осадков бухты. Это характеризует биогеохимический тип поведения плутония в бухте как педотропный, а донные отложения как его основное долгосрочное депо. Т.е. в процессе самоочищения водных масс бухты плутоний превалирующим образом не выводится из экосистемы, а перераспределяется в донные отложения.

Установлено, что макроводоросли, моллюски и рыбы, обитающие в акватории Севастопольской бухты, играют незначительную роль в самоочищении водных масс от $^{239+240}\text{Pu}$ (рис. 8). Их общий вклад составил менее 6 % от суммарного потока, из которых более 5 % приходилось на макрофиты – многолетнее депо плутония на масштабе их периода жизни. На безвозвратную долю извлечения плутония из водных масс посредством физических факторов, таких как гидрологический вынос и радиоактивный распад, приходилось менее 1 % от суммарного потока. Ведущим процессом, формирующим самоочищение природных вод в отношении плутония в экосистеме Севастопольской бухты, служит биогеохимический седиментационный поток взвешенного вещества, на долю которого приходится более 93% от суммарного потока (рис. 8).

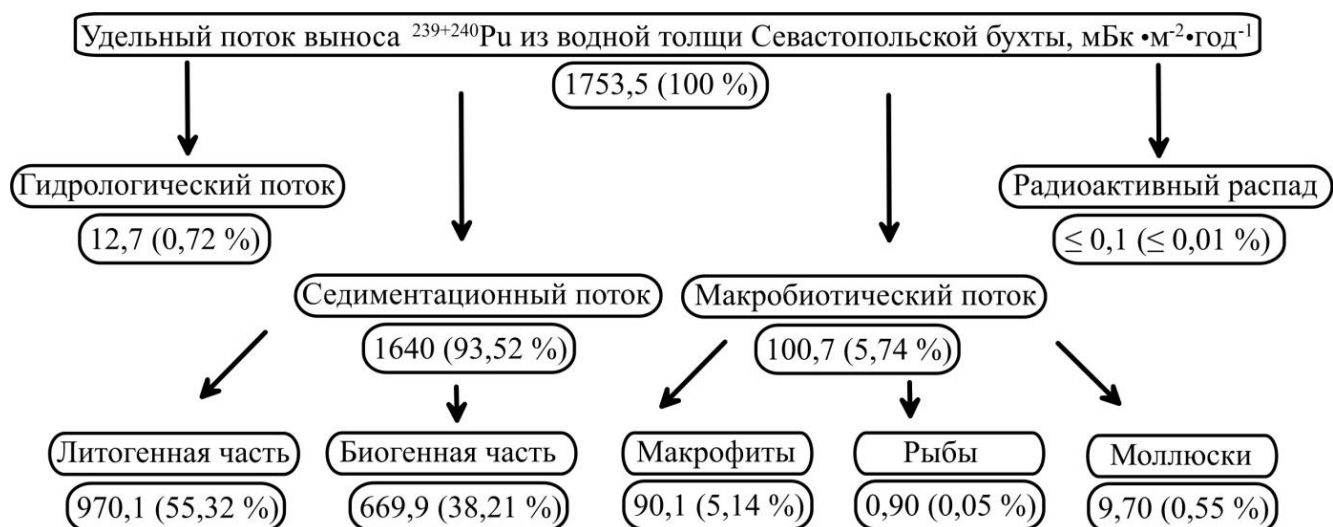


Рисунок 8 – Удельные потоки выноса $^{239+240}\text{Pu}$ из водной толщи

Учитывая, что биогенное вещество является результатом жизнедеятельности живых организмов, то биотический поток (макробиотический поток и поток биогенной составляющей осадочного вещества) составил 43,95 %, а 55,32 % приходилось на долю косного вещества (поток литогенной составляющей осадочного вещества). Поэтому, рассматривая роль живого и костного вещества в процессе формирования самоочищения морских вод можно сделать вывод о большом влиянии живого вещества на процессы перераспределения радиоизотопов плутония в морских прибрежных полузакрытых экосистемах.

В **заключении** обобщены результаты, полученные в ходе исследований. Показано, что выведение радиоизотопов плутония из экосистемы Севастопольской бухты происходит только посредством их гидрологического выноса в открытую часть моря и в результате процесса радиоактивного распада. Однако на эти процессы приходится менее 1 % от суммарного потока элиминации $^{239+240}\text{Pu}$ из водных масс. Поэтому самоочищение вод бухты от плутония происходит преимущественно за счет процессов его перераспределения в другие компоненты морской экосистемы. Суммарный вклад биотического извлечения $^{239+240}\text{Pu}$ из воды в результате аккумуляции макроводорослями, моллюсками и рыбами составил незначительную часть. Ведущим потоком, обуславливающим формирование самоочищения природных вод в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольской бухте, являлся биогеохимический седиментационный поток.

Выводы

1. На примере Севастопольской бухты установлено, что в прибрежных акваториях процессы взаимодействия радиоизотопов плутония с взвешенным веществом в воде и с осадочным веществом донных отложений играют ведущую роль в формировании самоочистительной способности вод в отношении плутония. Основным потоком самоочистения вод служит биогеохимический седиментационный поток взвешенного вещества на дно бухты.

2. Определены современные уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, донных отложениях, взвеси и референтных группах макробиоты в Севастопольской бухте. Самые высокие значения установлены для донных отложений и взвеси, величины которых уменьшались от устьевого района к верховью бухты.

3. В результате взаимодействия $^{239+240}\text{Pu}$ с компонентами экосистемы формируется их высокая аккумуляционная способность в отношении плутония. Коэффициенты накопления (K_H) $^{239+240}\text{Pu}$ уменьшались в ряду: взвешенное вещество – донные отложения – многолетние красные и бурые водоросли – двустворчатые и брюхоногие моллюски – придонные и придонно-пелагические рыбы – однолетние водоросли и морские травы – ракообразные – зоопланктон – пелагические рыбы – дельфины. Самые высокие K_H $^{239+240}\text{Pu}$ взвеси и донных отложений определили педотропный тип биогеохимического поведения плутония в бухте.

4. Установлено, что мощности доз от ионизирующего излучения $^{239+240}\text{Pu}$ в гидробионтах бухты соответствовали уровню биологического влияния на биоту, характерного для зоны природного фона по шкале Г. Г. Поликарпова. Региональные контрольные уровни $^{239,240}\text{Pu}$, не превышение которых является необходимым условием обеспечения радиационной безопасности как морской биоты, так и человека, составили $6,1 \cdot 10^{-3}$ Бк·л⁻¹ для воды и $0,7 \cdot 10^3$ Бк·кг⁻¹ для донных отложений.

5. Определенные значения скорости осадконакопления в до- и постчернобыльский период показали, что она не во всех районах бухты оставалась постоянной в эти периоды. В устьевой части произошло ее увеличение, а в верховье – уменьшение, что повлияло на скорость самоочистения вод от плутония. Показано, что изменение процессов осадконакопления является следствием строительства гидротехнических сооружений в акватории бухты и ее водосборном бассейне.

6. Общий вклад в процессы самоочистения вод от $^{239+240}\text{Pu}$ макробиоты бухты и физических факторов (гидрологического выноса и радиоактивного распада) не превышал 6,47 %. Превалирующая роль принадлежала биогеохимическому седиментационному потоку – 93,53 % от суммарного потока самоочистения.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Параскив, А.А. Содержание радионуклидов плутония в донных отложениях солёных озёр Крыма в сравнении с прибрежными акваториями Чёрного моря / А.А. Параскив, Н.Н. Терещенко В.Ю. Проскурнин // Морской биологический журнал. – 2019. – Т. 4. – № 2. – С. 41–51. **SCOPUS**
2. Параскив, А.А. Изменение седиментационных потоков плутония в донные отложения бухты Севастопольская в период до и после аварии на ЧАЭС / А.А. Параскив, Н.Н. Терещенко, В.Ю. Проскурнин, О.Д. Чужикова-Проскурнина // Морской биологический журнал. – 2021. – Т. 6. – № 2. – С. 69–81. **SCOPUS**
3. Proskurnin, V.Yu. Plutonium and americium in the deep Black Sea bottom sediments / V.Yu. Proskurnin, N.N. Tereshchenko, A.A. Paraskiv, O.D. Chuzhikova-Proskurnina // Journal of Environmental Radioactivity. – 2021. – Vol. 229. – Article no. 106540 (9 p.). **WoS, SCOPUS**
4. Параскив, А.А. Аккумулирующая способность гидробионтов и взвешенного вещества в отношении радионуклидов плутония в прибрежных акваториях (Севастопольская бухта, Черное море) / А.А. Параскив, Н.Н. Терещенко, В.Ю. Проскурнин, О.Д. Чужикова-Проскурнина, А.В. Трапезников, А.П. Платаев // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2022. – № 60. – С. 78–101. **WoS, SCOPUS**

Публикации в других рецензируемых изданиях:

1. Терещенко, Н. Н. Комплексный подход в оценке экологического состояния акваторий / Н. Н. Терещенко, В. Ю. Проскурнин, А. А. Параскив // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2019. – Т. 59. – № 6. – С. 627–642.
2. Параскив, А. А. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах экосистемы реки Чёрной и оценка его выноса в Севастопольскую бухту / А. А. Параскив, В. Ю. Проскурнин, Л. В. Малахова // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2021. – №. 7. – С. 27–33.

Глава в коллективной монографии:

1. Терещенко, Н. Н. Геохронологическая реконструкция седиментационных потоков техногенного плутония на основе радионуклидного определения скорости седиментации взвешенного вещества в осадки на полувековом масштабе / Н. Н. Терещенко, В. Ю. Проскурнин, С. Б. Гулин, А. А. Параскив // Система Черного моря / отв. ред. А. П. Лисицын. – Москва: Научный мир, 2018. Гл. 7.4. – С. 641–659.