

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «ИНСТИТУТ БИОЛОГИИ ЮЖНЫХ
МОРЕЙ ИМЕНИ А.О.КОВАЛЕВСКОГО РАН»
(ФИЦ ИнБЮМ)

На правах рукописи

Параскив Артем Алексеевич

Научный доклад об основных результатах подготовленной
научно-квалификационной работы (диссертации)

Ведущие процессы формирования качества природных вод в отношении
техногенных радионуклидов плутония ($^{238,239,240}\text{Pu}$) как результат
взаимодействия с биотическими и абиотическими компонентами экосистемы
Севастопольской бухты

Направление подготовки – 06.06.01 «Биологические науки»

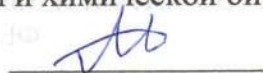
Направленность – Гидробиология

Специальность – 1.5.16 Гидробиология

Севастополь, 2022

Руководитель отдела радиационной и химической биологии,

к.б.н., в.н.с.

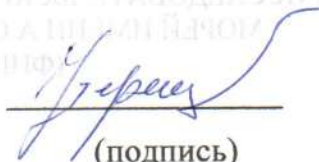


Мирзоева Н.Ю.

(подпись)

Научный руководитель,

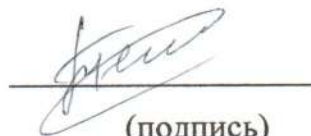
к.б.н., в.н.с.



Терещенко Н.Н.

(подпись)

Аспирант



Параскив А.А.

(подпись)

ОГЛАВЛЕНИЕ

I.	ОБЩАЯ	ХАРАКТЕРИСТИКА	НАУЧНО-
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ			3
1.1	Актуальность темы исследования.....		3
1.2	Степень разработанности проблемы исследования		3
1.3	Цель и задачи исследования		5
1.4	Научная новизна.....		5
1.5	Теоретическая и практическая значимость работы.....		6
1.6	Личный вклад автора		7
1.7	Методология и методы исследования.....		8
1.8	Положения, выносимые на защиту		9
1.9	Степень достоверности и апробация результатов		10
II	ОСНОВНОЕ	СОДЕРЖАНИЕ	НАУЧНО-
КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ			11
	Выводы		23
	Список работ, опубликованных по теме диссертации		25

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1.1 Актуальность 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, уровень воздействия загрязнителей на водную биоту, и определяют возможность сохранения биоразнообразия в экосистемах и их рекреационного, биопродукционного и хозяйственного потенциала (Остроумов, 2004; Александров, 2008; Егоров и др., 2018; Санитарно-биологические исследования..., 2018; Терещенко и др., 2019).

Одной из составляющих техногенных веществ, поступающих в природные экосистемы, являются антропогенные радиоактивные вещества. Поэтому важно изучать процессы, формирующие механизмы перераспределения радионуклидов в экосистеме, роль биотических и абиотических компонентов экосистемы в этих процессах. Источником техногенных радионуклидов служат ядерные технологии и аварии на ядерных объектах (Пути миграции..., 1999; WOMARS, 2005). К экологически важным техногенным радионуклидам относятся радиоизотопы плутония $^{238,239,240}\text{Pu}$, широко применяемые в ядерных технологиях и обладающие высокой радиотоксичностью (Пути миграции..., 1999; WOMARS, 2005; The chemistry..., 2010;).

1.2 Степень разработанности проблемы исследования

В Черном море уровни удельной активности $^{238,239,240}\text{Pu}$ изучали после

аварии на Чернобыльской АЭС в воде и донных отложениях в западной глубоководной области моря, его северо-западном шельфе, южной части моря и у северо-восточного побережья Кавказа (Polikarpov et al. 1991; Sanchez et al., 1991; Buesseler & Livingston, 1996; Gulin et al., 2002; Радиоэкологический отклик..., 2008; Tereshchenko et al.; 2018; Проскурнин и др., 2018). Есть немногочисленные данные о $^{238,239,240}\text{Pu}$ 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., 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 $^{238,239,240}\text{Pu}$ 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 не были выполнены исследования по комплексному изучению $^{238,239,240}\text{Pu}$ в Севастопольской бухте во всех основных компонентах морской экосистемы. Оценку дозовых нагрузок и всех основных процессов элиминации $^{238,239,240}\text{Pu}$ из воды не проводили, потоки $^{238,239,240}\text{Pu}$ в донные отложения и запасы плутония в осадках бухты в до- и пост-чернобыльский период не оценивали. Поэтому настоящая работа посвящена изучению перераспределения и миграции $^{238,239,240}\text{Pu}$ в прибрежной морской экосистеме Севастопольской бухты, количественному определению потоков элиминации $^{238,239,240}\text{Pu}$ из воды, определяющих самоочистительную способность вод акватории в отношении $^{238,239,240}\text{Pu}$, как результат взаимодействия плутония с компонентами морской экосистемы в до- и пост-чернобыльский период.

1.3 Цель и задачи исследования

Целью работы было определение ведущих процессов формирования самоочистительной способности морских природных вод в отношении техногенных радиоизотопов плутония ($^{238,239,240}\text{Pu}$) как результата их взаимодействия с биотическими и абиотическими компонентами в прибрежной морской экосистеме на примере Севастопольской бухты.

В ходе исследования решались следующие задачи:

1. Определить современные уровни удельной активности $^{238,239,240}\text{Pu}$ 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 экосистемы бухты и взвешенного вещества в отношении $^{239,240}\text{Pu}$, определить тип биогеохимического поведения плутония в бухте.
3. Охарактеризовать параметры процессов осадконакопления в экосистеме Севастопольской бухты на основе радиотрассерной геохронологии загрязнения донных отложений радиоизотопами плутония в до- и пост-чернобыльский период с учетом ее районирования.
4. 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.
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.

1.4 Научная новизна

В результате исследования определена удельная активность $^{238,239,240}\text{Pu}$ в референтных видах гидробионтов, поверхностной воде и взвеси в

Севастопольской бухте, их вертикальное распределение в донных отложениях с учетом районирования бухты. Выполнена оценка аккумулярующей способности биотических и абиотических компонентов экосистемы бухты в отношении плутония и определен биогеохимический тип его поведения в Севастопольской бухте.

Впервые для Севастопольской бухты проведен расчет региональных контрольных уровней $^{239,240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях, обеспечивающих радиационную безопасность морской биоты.

Показана возможность применения $^{238,239,240}\text{Pu}$ в качестве инструмента исследований – радиоактивных трассеров для определения количественных характеристик процессов осадконакопления в прибрежной морской акватории – Севастопольской бухте, в постчернобыльский период.

На примере Севастопольской бухты впервые для прибрежных морских экосистем Черного моря проведена оценка вклада основных потоков перераспределения и выноса радиоизотопов плутония в самоочищение вод бухты и выделены ведущие процессы, определяющие интенсивность самоочищения вод от радиоизотопов плутония.

1.5 Теоретическая и практическая значимость работы

В рамках настоящей работы получены количественные оценки аккумулярующей способности биотических и абиотических компонентов, взвешенного вещества Севастопольской бухты в отношении $^{239,240}\text{Pu}$, определен тип их биогеохимического поведения в бухте и ведущие процессы формирования качества вод в отношении плутония. Эти оценки расширяют понимание фундаментальных закономерностей, лежащих в основе процессов перераспределения $^{238,239,240}\text{Pu}$ в прибрежных морских экосистемах, определяющих интенсивность самоочищения водных масс от плутония.

Результаты данной работы могут быть использованы для формирования научно-обоснованной базы экологического нормирования

поступления радиоизотопов плутония в морскую среду прибрежных акваторий и служить основой прогнозирования процессов поведения веществ с идентичным плутонию типом биогеохимического поведения, их элиминации из водных масс в результате природных процессов, а также принятия решений о контрмерах в случае радиационных аварий.

Для мониторинговых исследований в качестве видов-индикаторов загрязнения вод плутонием рекомендуются следующие гидробионты: бурые водоросли *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, красные водоросли *Phyllophora crispa*, двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis* и бентосные рыбы *Scorpaena porcus*.

Показано, что определение количественных характеристик биогеохимических процессов 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.

1.6 Личный вклад автора

Диссертационная работа представляет собой самостоятельное научное исследование. 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 и 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.

1.7 Методология и методы исследования

Отбор проб природных образцов проводился в Севастопольской бухте с учетом ее районирования. Отбирались пробы воды, донных отложений, взвешенного вещества, макроводорослей, моллюсков и рыб. Материал был получен в 20 прибрежных морских экспедициях в период 2015–2021 гг. Часть исследованного материала, отобранного в период 2013–2015 гг. была предоставлена из архива проб ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ.

Все пробы были подвергнуты радиохимической обработке по стандартным методикам (Методика измерений..., 2015) с модификациями, учитывающими объем обрабатываемого материала (Paraskiv et al., 2021). Измерения проводились на альфа-спектрометрическом комплексе фирмы «ORTEC» (США). Полученные результаты подвергались статистической обработке, принятой в радиоэкологических исследованиях с использованием программы Maestro фирмы «ORTEC», а также программы Microsoft Excel (Measurement of Radionuclides..., 1989; Методика измерений..., 2015).

По уровням удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в биотических и абиотических компонентах бухты, была выполнена оценка их аккумулирующей способности в отношении $^{239,240}\text{Pu}$ посредством расчета коэффициентов накопления и фактора радиоемкости (Поликарпов, 1964).

Для расчета дозовых нагрузок и оценки возможного биологического влияния ионизирующего излучения $^{239,240}\text{Pu}$ на гидробионты в Севастопольской бухте использован программный комплекс ERICA Assessment Tool 2.0 (Brown et al., 2016).

Региональные контрольные уровни удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях бухты рассчитывали с учетом рекомендательных документов РФ (Порядок расчета..., 2016; Порядок расчета..., 2018).

На основе данных о вертикальном распределении удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ рассчитаны интегральные запасы этих радиоизотопов в донных отложениях Севастопольской бухты и проведена их геохронологическая датировка (Радиоэкологический отклик..., 2008; Проскурнин и др., 2018). По результатам датировки были определены скорость осадконакопления и абсолютные массы донных отложений, которые использовались для расчета потоков седиментационного перераспределения $^{238,239,240}\text{Pu}$ из водной толщи в осадки (Радиоэкологический отклик..., 2008; Егоров и др., 2018). По литературным данным о гидрологическом режиме Севастопольской бухты, а также биопродукционных характеристиках биотических компонент, была проведена количественная оценка гидрологического и биотического потоков выноса и перераспределения $^{238,239,240}\text{Pu}$ из водных масс бухты (Калугина-Гутник, 1975; Иванов и др., 2006; Стокозов, 2011; Современное состояние..., 2003; Кузьмина и др., 2016; Макаров и др., 2019).

1.8 Положения, выносимые на защиту

1. Ведущим процессом, формирующим интенсивность самоочищения вод Севастопольской бухты в отношении $^{238,239,240}\text{Pu}$, служит взаимодействие плутония с взвешенным веществом в воде и с осадочным веществом донных отложений, и основным потоком самоочищения вод является биогеохимическая седиментация взвешенного вещества в донные отложения. При этом основной вклад в самоочищение вод приходится на долю литогенной составляющей осадочного вещества и минерализованной части биогенного осадочного вещества.

2. Биотический поток выноса радиоизотопов плутония из воды Севастопольской бухты с учетом макро- и микробиотической его составляющих был равен менее 0,5 % от общего потока элиминации плутония из воды.
3. Аккумулирующая способность биотических и абиотических компонентов Севастопольской бухты в отношении $^{238,239,240}\text{Pu}$ уменьшается в ряду: взвешенное вещество – донные отложения – многолетние макроводоросли – двустворчатые моллюски – брюхоногие моллюски – однолетние макроводоросли – рыбы, что определяет педотропный тип биогеохимического поведения плутония, а его основным депо в экосистеме бухты служат донные отложения.
4. В современный период (2015–2021 гг.) дозовые нагрузки от ионизирующего излучения $^{239,240}\text{Pu}$ не представляют опасности для гидробионтов, обитающих в Севастопольской бухте, и относятся к зоне природного фона. Величина дозовой нагрузки в значительной степени определяется аккумулирующей способностью гидробионтов.
5. Региональные контрольные уровни $^{239+240}\text{Pu}$, обеспечивающие безопасность морской биоты, составляли в воде Севастопольской бухты $2,07 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$, а в донных отложениях – $5,0 \cdot 10^3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

1.9 Степень достоверности и апробация результатов

В ходе выполнения настоящей работы были использованы общепринятые методики (Measurement of Radionuclides..., 1989; Радиоэкологический отклик..., 2008; Методика измерений..., 2015; Brown et al., 2016; Порядок расчета..., 2016; Порядок расчета..., 2018). Измерение проб проводилось на оборудовании, проходящем плановые поверки и откалиброванном с использованием эталонных источников ионизирующего излучения.

Результаты работы докладывались и обсуждались на 13 научных мероприятиях, включая международные.

Всего по теме исследования опубликовано 19 работ, из них: статей в рецензируемых научных журналах – 4, 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 2 работы в рецензируемых научных изданиях, также входящих в международную наукометрическую базу SCOPUS.

В научных работах, опубликованных в соавторстве, вклад соискателя состоит в выборе и разработке методов исследования, получении экспериментальных данных, обсуждении и написании текста, подготовке иллюстративного материала публикаций. Права соавторов публикаций не нарушены.

II ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи, показана научная новизна и практическая значимость работы. Изложены основные положения, выносимые на защиту, приводится список публикаций и сведения об апробации работы.

В главе 1 дан краткий обзор современного состояния вопроса. Описаны основные источники и пути поступления^{238,239,240} в Черное море и в Севастопольскую бухту. Обсуждаются основные процессы, определяющие миграцию и перераспределение плутония в морских экосистемах. Указывается на отсутствие комплексного изучения Рн в биотических и абиотических компонентах экосистемы Севастопольской бухты.

В главе 2 дано описание района исследований, изученных объектов и объем исследованного материала. Всего в рамках настоящего исследования

отобрано и обработано проб: гидробионтов – 66, воды – 21, взвешенного вещества – 11, донных отложений – 97, воды для определения концентрации взвешенного вещества – 72. Описаны методики, используемые в работе.

Исследования проводились в период 2015–2021 гг. в акватории Севастопольской бухты и ее внешнего рейда (рисунок 1). В рамках настоящей работы было принято районирование акватории Севастопольской бухты на четыре бокса по гидролого-гидрохимическим и морфометрическим характеристикам, а также степени загрязненности (Иванов и др., 2006).

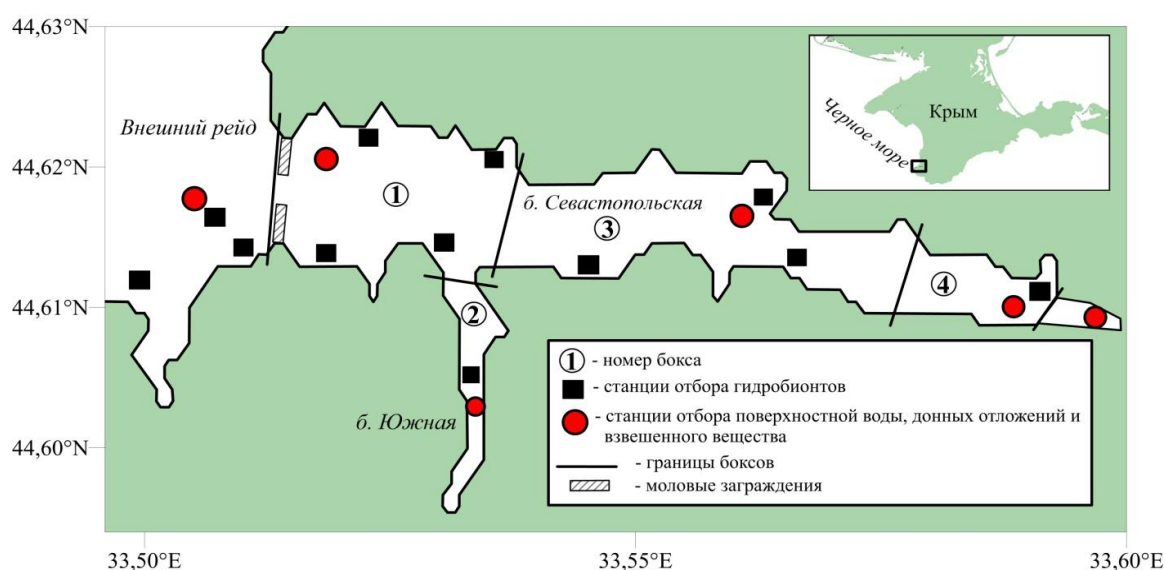


Рисунок 1 – Карта-схема станций отбора проб биотических и абиотических компонент экосистемы в Севастопольской бухте и акватории ее внешнего рейда, а также деление бухты на районы-боксы

В главе 3 представлены результаты определения современных уровней удельной активности $^{238,239,240}\text{Pu}$ в абиотических, биотических компонентах и взвешенном веществе изучаемых районов. Проведена геохронологическая датировка донных отложений для трех районов бухты – устьевой части (бокс 1), верховья (бокс 4) и внешнего рейда.

Вода. Результаты определения удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в поверхностных водах изучаемых районов представлены на рисунке 2.

Впервые для акватории Севастопольской бухты установлено, что максимальные значения удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ характерны для

вершины бухты (бокс 4) и устьевой части реки Черная, которая впадает в бухту в данной части ее акватории, и получены данные о величинах удельной активности ^{238}Pu , которые в современный период не превышают $0,3 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-3}$.

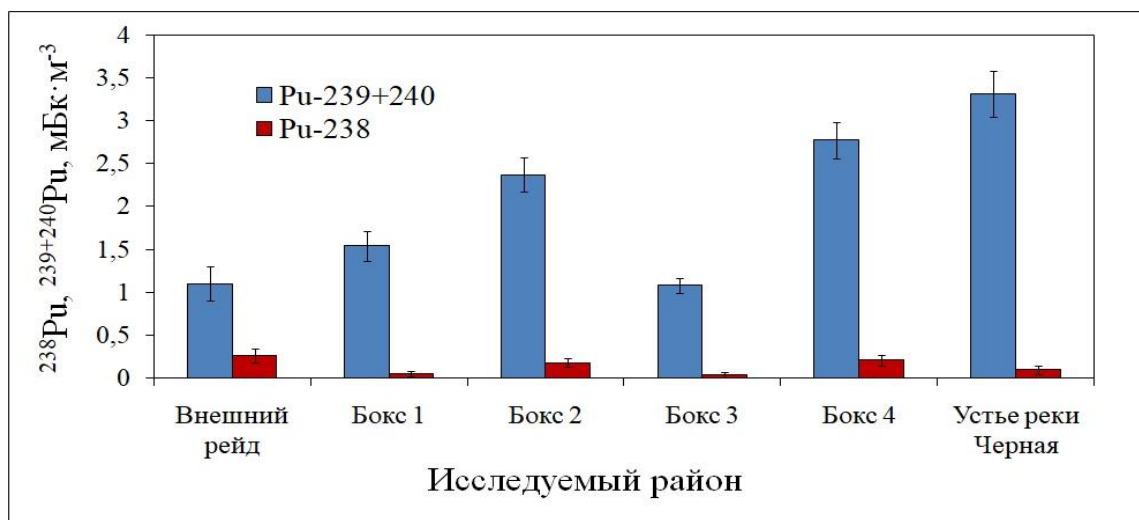


Рисунок 2 – Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в поверхностной воде районов исследования

Взвешенное вещество. Результаты определения $^{239+240}\text{Pu}$ во взвешенном веществе в поверхностных водах бухты приведены на рисунке 3. С использованием литературных данных (Gulin et al., 2014) была оценена доля $^{239+240}\text{Pu}$ на биогенной и литогенной составляющей взвешенного вещества.

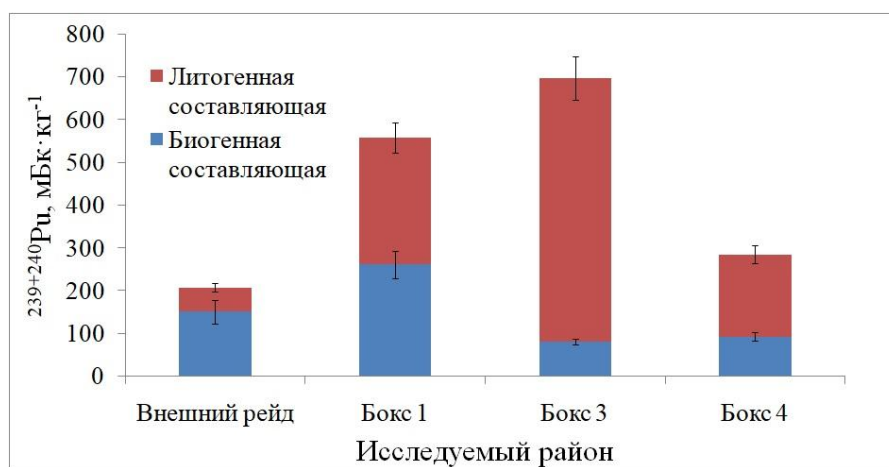


Рисунок 3 – Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ на биогенной и литогенной составляющей взвешенного вещества в поверхностных водах изучаемых районов

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

Донные отложения. Уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном 0–2 см слое донных отложений (рисунок 4) были сходны с таковыми, определенными во взвешенном веществе бухты, что и обуславливает характер современного пространственного распределения плутония в поверхностном слое донных осадков. Это указывает на то, что взвешенное вещество, вероятно, играет существенную роль в формировании удельной активности плутония в осадочном веществе донных отложений.

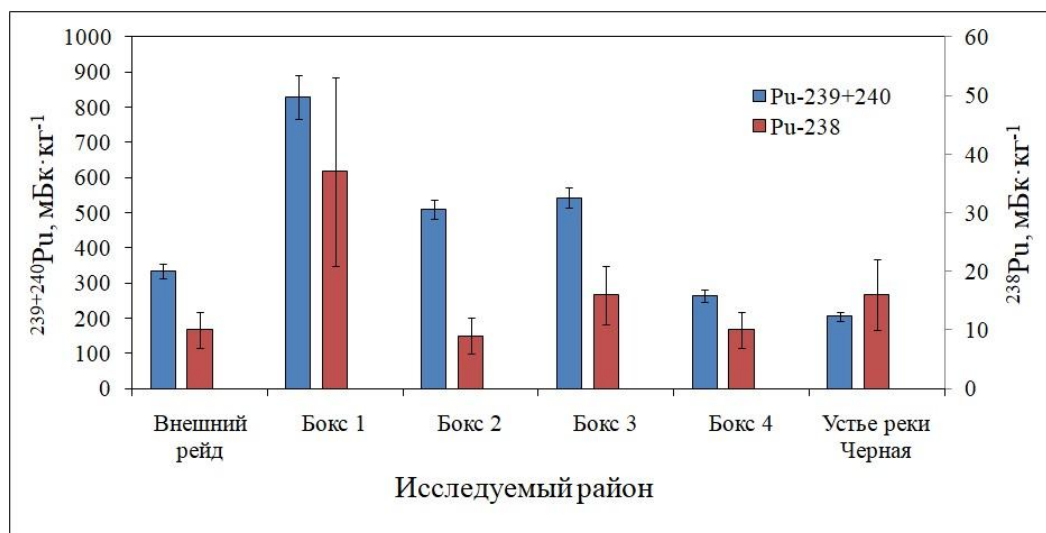


Рисунок 4 – Удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в поверхностном 0–2 см слое донных отложений изучаемых районов

Результаты вертикального распределения радиоизотопов плутония в донных отложениях бухты приведены на рисунке 5. С помощью метода радиоизотопной геохронологии, основываясь на анализе профилей

распределения удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$, а также их отношения, по глубине донных отложений, была проведена геохронологическая датировка осадков изучаемых районов.

Характер распределения ^{238}Pu в кернах донных отложений был схожим для изучаемых районов и характеризовался максимумами в слоях 14–16 см (рисунок 5а), 10–12 см (рисунок 5б) и 14–16 см (рисунок 5в). Такая картина распределения ^{238}Pu согласуется с историей поступления плутония в Черное море, а именно с тем фактом, что для радиоактивных выпадений после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.) отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ было на порядок величин больше, чем для глобальных выпадений после испытаний ядерного оружия в открытых средах (максимум – 1962 г.) (Радиоэкологический отклик..., 2008). Максимумы удельной активности ^{238}Pu обуславливали на порядок величин более высокие значения $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, что позволило отнести эти слои к 1986 году.

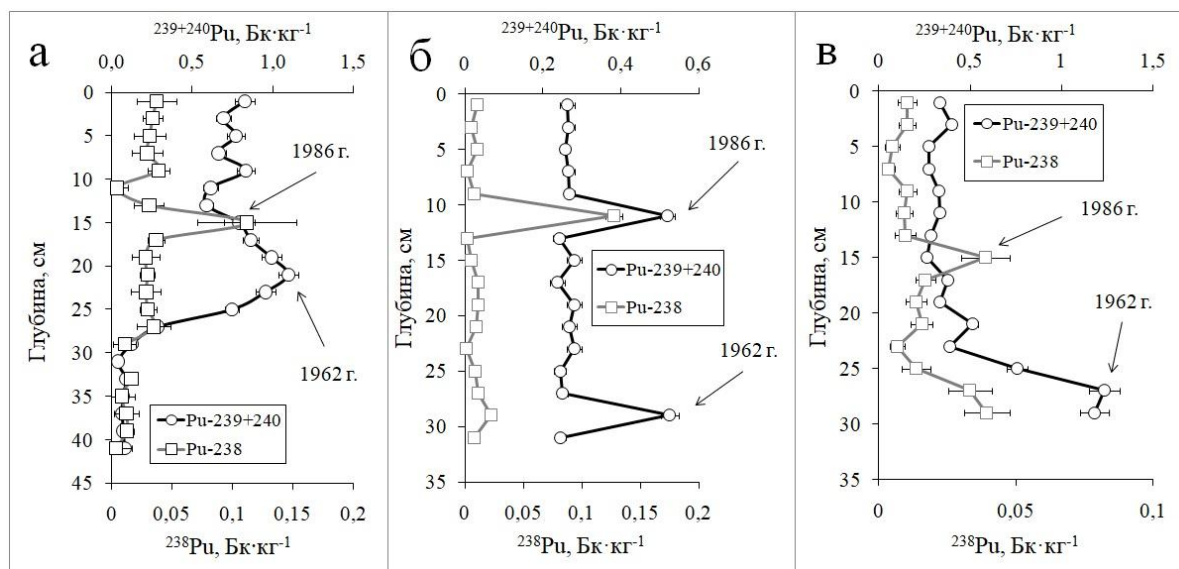


Рисунок 5 – Вертикальное распределение ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях устьевой части (а) и верховья (б) Севастопольской бухты, а также ее внешнего рейда (в)

Распределение $^{239+240}\text{Pu}$ по глубине донных осадков отличалось для изученных районов (рисунок 5). Так, для бокса 1 были характерны более высокие значения $^{239+240}\text{Pu}$, чем для бокса 4 и внешнего рейда. При этом в

боксе 4 определены два ярко-выраженных максимума $^{239+240}\text{Pu}$: в слоях 10–12 см и 28–30 см. Это позволило приурочить данные слои осадка к максимумам чернобыльских (1986 г.) и глобальных (1962 г.) выпадений, соответственно. Для профилей $^{239+240}\text{Pu}$ в боксе 1 и внешнем рейде было характерно наличие только одного максимума удельной активности при низком значении $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$: в слое 20–22 см (рисунок 5а) и 26–28 см (рисунок 5в). Это позволило датировать данные слои временем максимума глобальных выпадений, т.е. 1962 г.

На основе датировки донных отложений был произведен расчет скорости осадконакопления (SR) и абсолютных масс донных осадков (MAR) (таблица 1). Исходя из данных, представленных в таблице 1, можно сделать вывод об изменении SR и MAR в боксах 1 и 4. Полученный результат для устьевой части бухты согласуется с изменением гидрологического режима, произошедшим вследствие строительства заградительных сооружений на входе в бухту. Их строительство было завершено в 1986 г., выход из бухты был сужен с 1235 до 415 м, что повлекло за собой уменьшение её водообмена с открытой частью моря на 40–70 % (Иванов и др., 2006). Согласно полученным результатам, это привело к увеличению SR на 53 %.

Таблица 1 – Изменение скорости осадконакопления (SR) и абсолютных масс донных осадков (MAR) в боксе 1 и боксе 4 Севастопольской бухты, а также ее внешнем рейде в до- и пост-чернобыльский период

Район бухты	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 4	1962–1986	7,5	3895
	1986–2019	3,7	1679
Внешний рейд	1962–1986	5,0	4833
	1986–2019	4,8	4796

Уменьшение SR в верховье бухты, очевидно, также отражает антропогенное влияние на водный режим бухты за счет зарегулирования стока реки Черной после реконструкции Чернореченского водохранилища. Нарращивание плотины водохранилища было завершено в 1984 г.

(Чернореченское водохранилище, 1997), что и привело к увеличению забора воды с реки Черной и уменьшению ее стока в бухту, а, следовательно, и уменьшению поступления с речным стоком взвешенного вещества в верховье бухты и снижению SR на 51 % (таблица 1).

Гидробионты. Среди исследованных видов макрофитов наибольшие величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ были определены в красных водорослях *Phyllophora crispa* (Hudson) P.S.Dixon, 1964 ($7,33 \pm 0,54 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$) и бурых водорослях *Ericaria crinita* (Duby) Molinari & Guiry 2020 и *Gongolaria barbata* (Stackhouse) Kuntze 1891 ($3,13 \pm 0,39 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), ранее рассматриваемых как один род *Cystoseira* (Sadogurska et al., 2021).

Величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в раковинах мидий *Mytilus galloprovincialis* Lamarck, 1819 лежали в широком диапазоне значений: $0,47 - 13,1 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Максимальные значения характерны для раковин с наибольшей длиной, однако достоверной зависимости удельной активности плутония от размера раковин обнаружено не было. Впервые для Черного моря определена удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в раковинах хищного моллюска-вселенца *Rapana venosa* Valenciennes, 1846. Среднее значение удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в них составило $2,3 \pm 1,2 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$.

В качестве референтных видов рыб были изучены представители хищных бентосных рыб *Scorpaena porcus* Linnaeus, 1758, пелаго-бентосных рыб *Spicara maena* Linnaeus, 1758 и *Mullus barbatus ponticus* Essipov, 1927. Наибольшее внимание было уделено биоиндикаторному для Севастопольской бухты виду (Малахова и др., 2018) *S. porcus*. Для данного вида были характерны наибольшие величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$: $0,40 - 11,05 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$. Было изучено содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в разных тканях и органах особей *S. porcus* (рисунок 6).

Показано, что большая часть (более 50%) $^{239+240}\text{Pu}$ в особях *S. porcus* аккумулируется в жабрах, близкие количества аккумулируют кости и печень (20,1 и 20,3% соответственно), и лишь небольшая часть плутония (6,2 %) накапливается в мышцах.

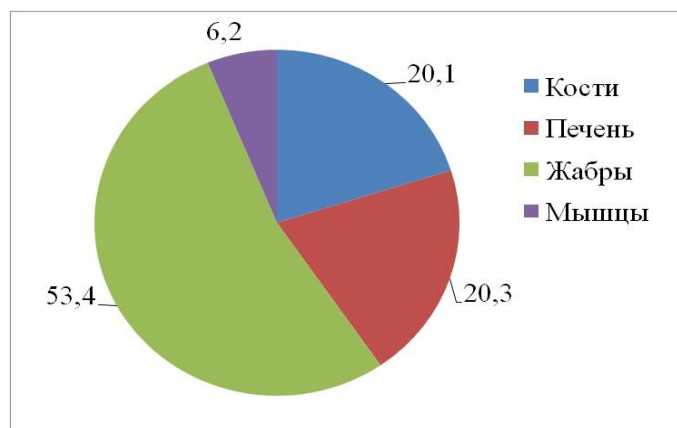


Рисунок 6 – Доля $^{239+240}\text{Pu}$ в тканях и органах рыб *Scorpaena porcus*

В главе 4 выполнена оценка аккумуляционной способности референтных видов гидробионтов в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ посредством расчета коэффициентов накопления плутония $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ (рисунок 7). Также определены $K_H(^{239+240}\text{Pu})$ для таких важных звеньев трофической цепи, как фитопланктон (с использованием литературных данных (Wilson et al., 2009)), зоопланктон (по результатам, полученным в 103 рейсе НИС «Профессор Водяницкий») и черноморских крабов *Carcinus sp.* (Терещенко и др., 2013).

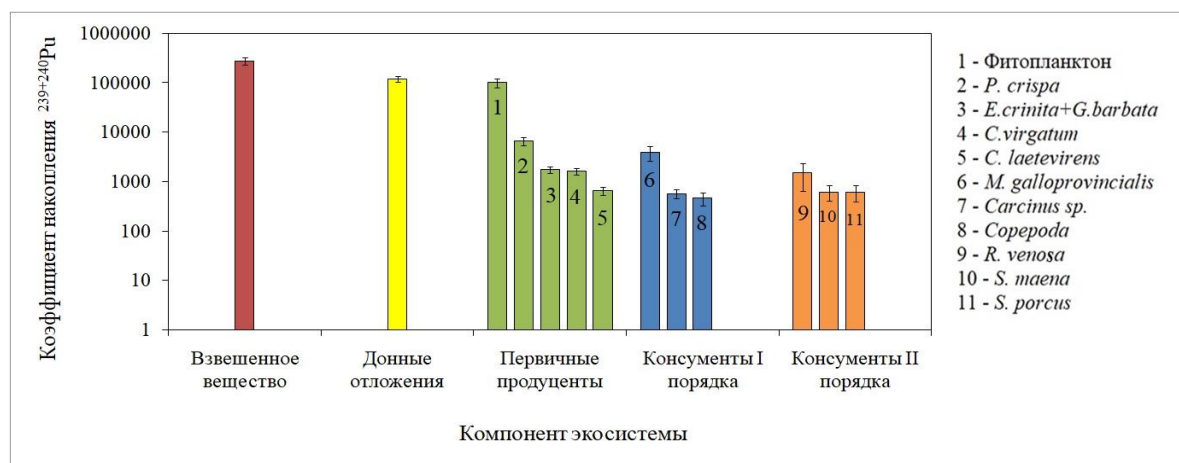


Рисунок 7 – Коэффициенты накопления плутония изученными видами гидробионтов, донными отложениями и взвешенным веществом в Севастопольской бухте

Показано, что в Севастопольской бухте взвешенное вещество и донные отложения обладают наибольшими K_H – $\sim 10^5$. K_H у гидробионтов были ниже, но достаточно высокими, поэтому происходит усиление потока $^{239+240}\text{Pu}$ по трофическим цепям и его накопление обитателями бухты до уровней

концентраций, значительно превышающих таковые в воде, согласно величине K_H , т.е. до концентраций в 100–100000 раз выше, чем в воде.

Высокая аккумуляционная способность макрофитов *P. crispa*, *E. crinita* и *G. Barbara* ($K_H^{239+240}\text{Pu} = n \cdot 10^3$), по всей видимости, может быть обусловлена тем, что данные виды являются долгоживущими (до 10-12 лет), вегетирующими круглый год, и содержащими в своем составе такие органические вещества как агароид, альгиновые кислоты и фукоидан, являющиеся природными сорбентами для радионуклидов и тяжелых металлов (Тунакова, 2011; Поздеев и др., 2015; Осовская и Приходько, 2020). Также, вероятно, вклад в высокую аккумуляционную способность этих организмов может вносить такая особенность их морфологии, как высокая кустистость, что значительно увеличивает площадь поверхности таллома, и, как следствие, возможность аккумулировать плутоний из водной среды.

Установлено, что для мидий *M. galloprovincialis*, обитающих в толще воды (на коллекторах марикультурного хозяйства) $K_H^{239+240}\text{Pu}$ несколько выше (4702), чем для мидий, обитающих на донных субстратах (1872). Это можно объяснить различиями условий питания моллюсков. Было показано, что скорости биологических процессов у мидий, обитающих в толще воды, значительно выше, чем у особей, живущих на грунте (Супрунович и Макаров, 1990). Это связано с равномерным распределением мидий на коллекторах в толще воды, где каждая особь лучше омывается водой и обеспечивается пищей, в результате чего наблюдали более высокие показатели жизненных процессов, что и может приводить к усиленной аккумуляции из водной среды веществ, включая радиоизотопы плутония.

Остальные группы гидробионтов, такие как однолетние многоклеточные зеленые водоросли, копеподы, крабы и рыбы, характеризуются сравнительно более низкой аккумулирующей способностью в отношении плутония, но в целом достаточно значимой ($K_H^{239+240}\text{Pu} = n \cdot 10^2$). Хотя плутоний не является биологически активным элементом, как показали исследования, его накопление гидробионтами характеризуется

значительными величинами K_H и в мелководных прибрежных акваториях при высокой численности и биомассе биотические компоненты могут оказывать существенное влияние на самоочищение вод от плутония.

В главе 5 приведены результаты расчета дозовых нагрузок, создаваемых $^{239+240}\text{Pu}$ в гидробионтах Севастопольской бухты. Показано, что при современных уровнях величин удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях бухты не достигаются значения пороговых величин безопасных мощностей доз: $0,1 \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$ для млекопитающих и позвоночных животных и $1 \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$ для растений и беспозвоночных животных (International commission..., 2007; Оценка радиационно-экологического..., 2015). В отечественных рекомендательных документах приведены значения контрольных уровней (КУ) радионуклидов в воде и донных отложениях, обеспечивающие радиационную безопасность референтных групп гидробионтов (Порядок расчета..., 2016; Порядок расчета..., 2018). При этом данные КУ рассчитаны с учетом усредненных величин K_H в различных морях и океанах. Поэтому была проведена оценка КУ $^{239+240}\text{Pu}$, учитывающих региональные особенности Севастопольской бухты (таблица 2).

Таблица 2 – Величины региональных и рекомендованных контрольных уровней (КУ) $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях Севастопольской бухты

Референтная группа	Вид	КУ $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, Бк·л ⁻¹		КУ $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях, Бк·кг ⁻¹	
		региональный	рекомендованный	региональный	рекомендованный
Макроводоросли	<i>Phyllophora crispa</i>	2,07	3,46	$5,0 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^3$
	<i>Ericaria crinita</i> + <i>Gongolaria barbata</i>	7,9		$19,1 \cdot 10^3$	
	<i>Ceramium virgatum</i>	8,5		$20,6 \cdot 10^3$	
	<i>Cladophora laetevirens</i>	21,1		$51,8 \cdot 10^3$	
Моллюски	<i>Mytilus galloprovincialis</i>	3,5	4,62	$8,6 \cdot 10^3$	$9,2 \cdot 10^3$
	<i>Rapana venosa</i>	9,3		$22,4 \cdot 10^3$	
Рыбы пелагические	<i>Spicara maena</i>	2,2	13,89	-*	-
Рыбы бентосные	<i>Scorpaena porcus</i>	2,3	13,46	$5,5 \cdot 10^3$	$27,8 \cdot 10^3$

* – расчет КУ радионуклидов в донных отложениях для пелагических рыб не проводится

Установлено, что для акватории Севастопольской бухты характерны более низкие величины КУ $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях, чем значения, приведенные в рекомендательных документах. Также показано, что величины КУ могут отличаться для различных видов гидробионтов в рамках референтной группы организмов. Для мониторинговых исследований в качестве видов-индикаторов загрязнения вод плутонием рекомендуется рассматривать следующие гидробионты: многолетние бурые водоросли *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, красные водоросли *Phyllophora crispa*, двустворчатые моллюски *Mytilus galloprovincialis* и бентосные рыбы *Scorpaena porcus*. В качестве результирующего контрольного уровня принимается его наименьшее значение, характерное для исследованных видов. Таким образом, контрольный уровень $^{239+240}\text{Pu}$ в воде Севастопольской бухты, обеспечивающий безопасность морской биоты, составляет $2,07 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$, а в донных отложениях – $5,0 \cdot 10^3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ сырого веса.

В 6 главе приводятся результаты расчетов удельных запасов $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях бухты, фактора радиоемкости плутония. Установлено, что более 99 % удельного запаса $^{239+240}\text{Pu}$ в бухте находится в донных отложениях, что свидетельствует о педотропном типе биогеохимического поведения плутония. Рассчитаны удельные потоки выноса $^{239+240}\text{Pu}$ из водных масс (рисунок 8). Показано, что гидрологический поток выноса $^{239+240}\text{Pu}$ из вод бухты в результате водообмена с открытой частью моря играет незначительную роль (0,21 %). Среди изученных референтных групп морских организмов в Севастопольской бухте основной вклад в процесс перераспределения плутония вносят макрофиты.

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод о том, что ведущим процессом, влияющим на элиминацию радиоизотопов плутония из водных масс в Севастопольской бухте, является поток биогеохимической седиментации взвешенного вещества в донные отложения, на долю которого приходится свыше 99 % от суммарного удельного потока. При этом в среднем для бухты преобладает литогенная составляющая осадочного

вещества – 57 %, а биогенная составила 43 % (рисунок 8). Интенсивность выноса плутония в донные отложения с седиментационным потоком определяется, главным образом, помимо удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, SR, MAR, K_H плутония взвесью, концентрацией взвеси и ее размерным составом.

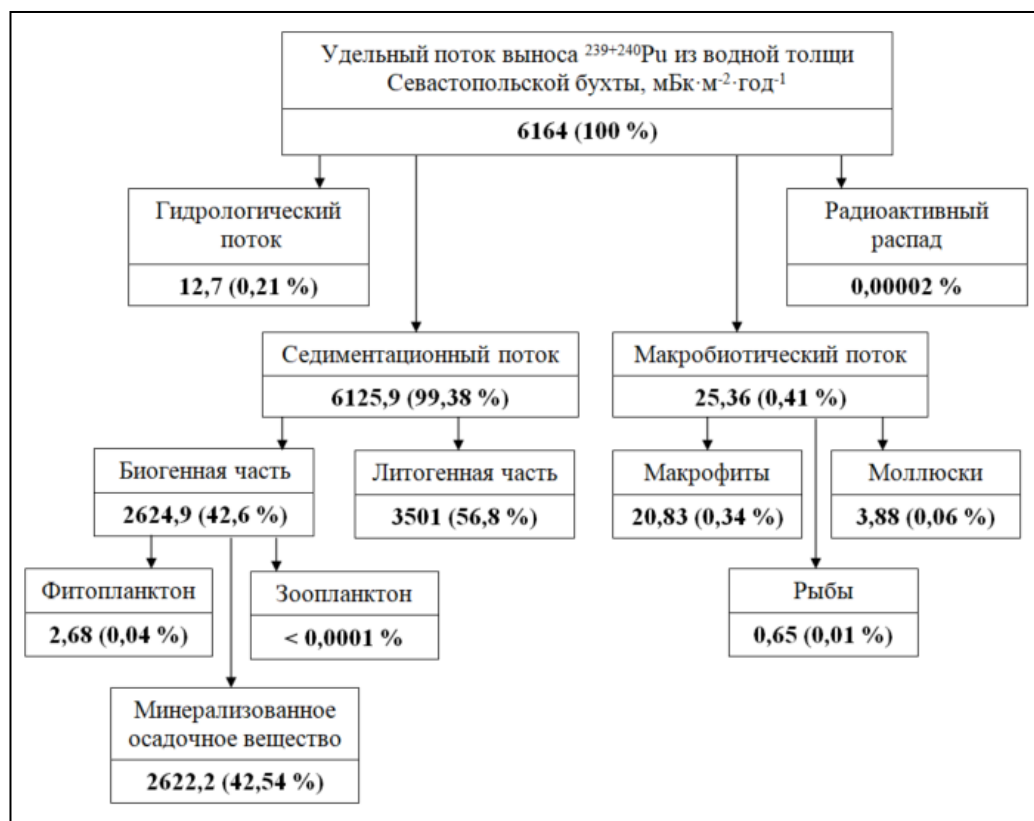


Рисунок 8 – Удельные потоки элиминации $^{239+240}\text{Pu}$ из водной толщи в Севастопольской бухте

Планктонные организмы в течение своего непродолжительного жизненного цикла и, имея относительно небольшую биомассу, извлекают $^{239+240}\text{Pu}$ из водной толщи в незначительной степени, не смотря на высокую аккумулирующую способность. Так, на долю биотического вещества в биогенной составляющей осадочного вещества приходится 0,1 %, а на долю минерализованного взвешенного вещества – 99,9 %.

В целом, процентная доля биотического потока (микро- и макробиота) в самоочищении воды от плутония в бухте составляла менее 0,5 %

Выводы

1. Установлено, что в прибрежных акваториях на примере Севастопольской бухты 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 и основным потоком самоочищения вод служит седиментационный поток взвешенного вещества в донные отложения.
2. Определены современные уровни удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ для представителей референтных групп гидробионтов в Севастопольской бухте ($0,4 \pm 0,1$ – $13,1 \pm 2,0$ мБк·кг⁻¹). Наибольшие значения установлены для многолетних водорослей: *Phyllophora crispa*, *Ericaria crinita* и *Gongolaria barbata*, для моллюсков – *Mytilus galloprovincialis* и для рыб – *Scorpaena porcus*.
3. Определено, что в поверхностной воде Севастопольской бухты удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ изменялась в пределах $1,08 \pm 0,09$ – $3,31 \pm 0,27$ мБк·м⁻³, увеличиваясь от устья бухты к ее вершине, а в поверхностном слое донных отложений напротив – снижалась, варьируя в диапазоне от 262 ± 15 до 765 ± 53 мБк·кг⁻¹. Отмечено, что величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном слое донных осадков остаются практически неизменными в последнее десятилетие, что указывает на стационарность потоков поступления плутония в воды бухты и его элиминации из вод в донные отложения.
4. Установлено, что в результате взаимодействия $^{239+240}\text{Pu}$ с биотическими, абиотическими компонентами и взвешенным веществом в экосистеме Севастопольской бухты формируется их высокая аккумуляционная способность в отношении плутония. Коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ уменьшались в ряду: взвешенное вещество, донные отложения ($\cdot 10^5$); многолетние красные и бурые водоросли ($\cdot 10^3$); однолетние красные и зеленые водоросли ($\cdot 10^2$ – $\cdot 10^3$); двустворчатые и

брюхоногие моллюски ($n \cdot 10^2 - n \cdot 10^3$); рыбы придонные и придонно-пелагические ($n \cdot 10^2$).

5. Наибольшие величины коэффициентов накопления $^{239+240}\text{Pu}$ для взвешенного вещества и донных отложений и высокие значения скорости осадконакопления определили фактор радиоемкости, равный 99-и процентам в Севастопольской бухте, что характеризует биогеохимический тип поведения плутония в бухте как педотропный, а донные отложения играют роль основного долгосрочного депо плутония в бухте.

6. Определены скорости осадконакопления в до- и пост-чернобыльский период в Севастопольской бухте, которые изменялись от 2,5 до 7,5 $\text{мм} \cdot \text{год}^{-1}$, превышая скорость осадконакопления в глубоководной части Черного моря ($0,8 \text{ мм} \cdot \text{год}^{-1}$), характеризуя более высокую способность вод бухты к самоочищению. Отличие скоростей осадконакопления в различных боксах бухты оказывало влияние на потоки биогеохимической седиментации взвеси в донные осадки, и, следовательно, обуславливало разную скорость самоочищения вод в каждом боксе от плутония.

7. Установлено, что в современный период мощности доз от ионизирующего излучения $^{239,240}\text{Pu}$ в гидробионтах бухты изменялись от $7,2 \cdot 10^{-4}$ до $6,5 \cdot 10^{-6} \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$ и не превышали диапазона мощностей доз, характерного для зоны природного фона. Величина дозовой нагрузки зависит не только удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$ в воде, но и в значительной степени определяется аккумуляционной способностью гидробионтов в отношении плутония.

8. Впервые для Севастопольской бухты определены региональные контрольные уровни удельной активности $^{239,240}\text{Pu}$, обеспечивающие безопасность морской биоты: $2,07 \text{ Бк} \cdot \text{л}^{-1}$ для воды и $5,0 \cdot 10^3 \text{ Бк} \cdot \text{кг}^{-1}$ для донных отложений.

9. Биотические компоненты экосистемы бухты играют незначительную роль в самоочищении вод от радиоизотопов плутония. Так, суммарный вклад

микро- и макробиоты бухты в процессы самоочищения вод от $^{239,240}\text{Pu}$ не превышал 0,5 % от суммарного потока.

10. На долю физических факторов приходилось порядка 0,2102 % от суммарного потока самоочищения вод от плутония: на гидрологический вынос – 0,21 % и радиоактивный распад $^{239,240}\text{Pu}$ – 0,0002 %.

11. Превалирующая роль в самоочищении вод бухты от плутония принадлежала биогеохимическому седиментационному потоку – 99,38 %. При этом, на долю литогенной составляющей осадочного вещества приходилось 56,8 %, а на долю биогенной – 42,6 %, в которой основную часть составляло минерализованное биогенное осадочное вещество (99,9 %), а доля биотической составляющей биогенного осадочного вещества не превышала 0,1 %.

Список работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи

1. Параскив А.А., Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю. Содержание радионуклидов плутония в донных отложениях солёных озёр Крыма в сравнении с прибрежными акваториями Чёрного моря // Морской биологический журнал. 2019. Т. 4, № 2. С. 41-51
2. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Параскив А.А. Комплексный подход в оценке экологического состояния акваторий // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59, № 6. С. 627-642.
3. Параскив А.А., Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Чужикова-Проскурнина О.Д. Изменение седиментационных потоков плутония в донные отложения бухты Севастопольская в период до и после аварии на ЧАЭС // Морской биологический журнал. 2021. Т. 6, № 2. С. 69-82.
4. Параскив А.А., Проскурнин В.Ю., Малахова Л.В. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах экосистемы реки Чёрной и оценка его выноса в

Севастопольскую бухту // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2021. № 7. С. 27-33.

Главы в коллективных монографиях

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