

УТВЕРЖДАЮ

Директор

Федерального государственного
бюджетного учреждения науки

Мурманского морского биологического

института Российской академии наук

доктор биологических наук



М.В. Макаров

«25» сентября 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Мурманского морского биологического института

Российской академии наук на диссертационную работу

Параскива Артема Алексеевича

«Процессы формирования самоочищения природных вод в отношении
радиоизотопов плутония ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в прибрежных морских акваториях»,

представленную на соискание учёной степени

кандидата биологических наук

по специальности 1.5.16 – гидробиология

Актуальность темы работы. В диссертации Параскива А.А. на основе анализа многолетних данных о содержании изотопов плутония в биотических и абиотических компонентах Севастопольской бухты исследованы процессы выведения и перераспределения техногенной активности, поступившей в морскую среду после испытаний атомного оружия в 1960-х гг. и аварии на ЧАЭС в 1986 г. Севастопольская бухта – полузакрытая прибрежная морская акватория, широко используется в хозяйственной деятельности, вследствие чего потенциально относится к зоне критической антропогенной нагрузки. Исследование взаимодействия изотопов плутония с компонентами исследуемой экосистемы крайне важно для понимания процессов самоочищения вод и формирования качества

водной среды в радиационно-загрязненных морских акваториях, а также определения уровня дозовых нагрузок на гидробионты. Применение радиоизотопов плутония в качестве геохронологического маркера актуально в рамках изучения хронологии осадконакопления в прибрежных районах моря, измененных в ходе антропогенной деятельности.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения, выводов, и списка литературы из 221 наименования. Объем диссертации – 194 стр.

Основные результаты, полученные в диссертации.

В *первом разделе* приведено обобщение литературных данных о природных условиях в Севастопольской бухте и процессах, способствующих очищению морских вод от антропогенных загрязнений. Показано, что распределение техногенных радионуклидов в экосистеме зависит от гидрологических процессов, биоаккумуляции, а также седиментации взвешенного биогенного и литогенного вещества в донные отложения. Обоснована необходимость определения типа биогеохимического поведения, а также основных природных процессов, обуславливающих очищение водных масс морской экосистемы от консервативных техногенных веществ, к которым относят радиоактивные изотопы плутония. Изотопы ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu поступили в Черное море с атмосферными выпадениями после испытаний ядерного оружия, а также в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Регулярные исследования удельной активности изотопов плутония в компонентах черноморской экосистемы проводили с конца 1980-х гг. в северо-западной шельфовой и западной глубоководной частях моря. Показана способность черноморских гидробионтов аккумулировать $^{239+240}\text{Pu}$ несмотря на низкие уровни радионуклида в воде. Проанализирована изученность распределения радиоизотопов плутония в поверхностном 0–5 см слое донных отложений Черного моря. Показано, что определение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и в донных отложениях проводили преимущественно в открытой части Черного моря, исследование побережья

носило эпизодический характер. На основании данных по радиоактивному и химическому загрязнению описаны потенциальные зоны критического загрязнения в Черном море, включающие шельфовые районы и эстуарии рек. Обоснована необходимость проведения комплексных исследований загрязнения изотопами плутония черноморской экосистемы для количественной оценки элиминации техногенной радиоактивности из природных вод и выявления основных процессов, формирующих качество морской среды в регионе. Оценена перспективность использования ^{238}Pu , ^{239}Pu и ^{240}Pu для геохронологической датировки донных отложений и оценки скорости седиментации в разных частях моря. В данном разделе выполнен сравнительный анализ современных подходов к определению дозовых нагрузок на биоту и нормированию содержания техногенных радионуклидов в морских экосистемах. Для нормирования содержания радионуклидов в море вместо дозовых критериев предложено использовать контрольные уровни удельной активности радиоизотопов в воде и донных отложениях.

Во *втором разделе* описаны материалы и методы, используемые в диссертационной работе. Приведена карта-схема отбора проб в Севастопольской бухте и ее деление на районы-боксы по гидролого-гидрохимическим и морфометрическим характеристикам, а также степени загрязненности. Исследование проводили в период 2013-2021 гг. на 20 станциях: в Севастопольской бухте, акватории ее внешнего рейда и реки Черная, впадающей в верховье бухты. Дано обоснование к выбору объектов исследования. Материал, на основе которого построена работа, представлен в таблицах метаданных. Дано описание применяемых методов: радиохимической подготовки проб, альфа-спектрометрии, статистической обработки данных, расчета радиоэкологических параметров (коэффициентов накопления, фактора радиоемкости, удельных запасов и основных удельных потоков элиминации плутония из водных масс), радиотрассерного метода геохронологической датировки донных отложений, расчета дозовых нагрузок с помощью программного комплекса ERICA Assessment Tool, а также

разработанной Росгидрометом методики расчета контрольных уровней содержания радиоизотопов в воде и донных отложениях, обеспечивающих безопасность морских организмов.

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.

В *третьем разделе* представлены результаты измерений удельной активности ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, донных отложениях и гидробионтах Севастопольской бухты. На основании полученных результатов соискателем были оценены коэффициенты накопления исследуемых радионуклидов во взвешенном веществе, донных отложениях и различных видах биоты прибрежной экосистемы.

В *подразделе 3.1* обсуждается удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностном слое воды Черного моря. Определено, что загрязнение вод изотопами плутония в Севастопольской бухте выше, чем в глубоководных частях моря. Выявлено снижение концентраций радионуклида в воде по направлению от вершины бухты к ее устью. Анализ содержания изотопов плутония в растворенной, взвешенной и интегральной формах, а также определение концентрации взвеси в воде позволили автору работы сделать вывод о том, что повышение уровня содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде в зоне смешения река-море (бокс 4 и устье р. Черная), вероятно, связано с увеличением концентрации взвеси в этой части акватории. Вывод подтвержден корреляционной связью между удельной активностью $^{239+240}\text{Pu}$ и концентрацией взвеси в воде. Также на основе исследованного материала рассчитана доля $^{239+240}\text{Pu}$ в составе биогенной и литогенной составляющей осадочного вещества. Результаты расчетов показали, что в верховье бухты и в боксах 3 и 4 изотопы плутония преимущественно связаны с литогенной частью взвеси, в боксе 1 равномерно распределены между биогенной и литогенной составляющими, а на внешнем рейде основную роль в

элиминации радионуклида из воды играет биогенная часть. В данном разделе также выполнен расчет коэффициентов накопления (K_n) $^{239+240}\text{Pu}$ взвешенным веществом. Сделано предположение, что сорбция на частицах взвеси является одним из главных факторов очищения вод Севастопольской бухты от $^{239+240}\text{Pu}$.

В подразделе 3.2 рассмотрены результаты измерений удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в представителях различных экологических групп биоты, рассчитаны коэффициенты накопления данных радионуклидов гидробионтами, а также обсуждается влияние особенностей строения и условий обитания морских организмов на величину K_n . Удельная активность ^{238}Pu во всех изученных биологических пробах, отобранных в Севастопольской бухте и смежных акваториях в период 2013-2021 гг., была ниже минимально детектируемой активности ($< 0.1 \text{ мБк} \cdot \text{кг}^{-1}$), поэтому в подразделе 3.2 приводятся результаты измерений только $^{239+240}\text{Pu}$, как одного из основных дозообразующих радионуклидов в современном период. Максимальное накопление $^{239+240}\text{Pu}$ было обнаружено в красных (*Phyllophora* sp.) и бурых (*Cystoseira* sp.) водорослях, раковинах мидий (*M. galloprovincialis*) и бентосных рыбах (*S. porcus*). Высокая аккумуляция изотопов плутония многолетними водорослями-макрофитами *Phyllophora* sp. и *Cystoseira* sp. по мнению соискателя, связана с высоким содержанием в талломах природных сорбентов радионуклидов и тяжелых металлов, таких как агароиды, альгиновые кислоты и фукоидан, а также длительностью жизни этих макрофитов. В разделе показано, что раковины (*M. galloprovincialis*) (моллюск-фильтратор) накапливали больше изотопа, чем раковины *R. venosa* (моллюск-хищник). Выявлены различия в накоплении $^{239+240}\text{Pu}$ раковинами моллюсков одного вида, обитающих в различных условиях. В мидиях, живущих на коллекторах марихозайства уровни $^{239+240}\text{Pu}$ были выше, чем в особях, обитающих на донных субстратах. Приводится линейная зависимость между размерными характеристиками раковин (*M. galloprovincialis*) и удельной активностью $^{239+240}\text{Pu}$. Установлено, что

бентосные рыбы *S. porcus*, ведущие оседлый образ жизни, накапливают больше $^{239+240}\text{Pu}$, чем рыбы *M. barbatus ponticus*, также обитающие у дна, но мигрирующие на значительные расстояния. Впервые показано распределение $^{239+240}\text{Pu}$ в органах и тканях черноморских рыб на примере *S. porcus*. Определено, что более 50 % удельной активности изотопа аккумулируется в жабрах, 20,1 % в костях, 20,3 % печени и 6,2 % в мышцах.

В подразделе 3.3 приведены результаты расчетов мощностей доз от альфа-излучения $^{239+240}\text{Pu}$ для групп биоты Севастопольской бухты. Установлено, что полученные значения ниже критерия экологически безопасного радиационного воздействия, установленного для млекопитающих и позвоночных животных ($0,1 \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$), а также для растений и беспозвоночных животных ($1 \text{ мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$) (ICRP, 2008; Р 52.18.820-2015). Интегральная мощность дозы, рассчитанная для биоты Севастопольской бухты согласно концептуальной модели зональности хронического действия мощностей доз ионизирующих излучений в природе Г.Г. Поликарпова, соответствует зоне «природного фона».

В подразделе 3.4 обсуждаются данные по содержанию ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в 0–5 см слое донных отложений. Сравнение результатов 2013-2021 гг. с данными, полученными в 2007-2011 гг. не выявило изменений, что свидетельствует о постоянстве потока вторичного поступления рассеянного плутония из воды в донные отложения в течение исследуемого периода.

В подразделе 3.5 выполнен сравнительный анализ текущих коэффициентов аккумуляции $^{239+240}\text{Pu}$ биотическими и абиотическими компонентами экосистемы Севастопольской бухты. Максимальные коэффициенты накопления характерны для абиотической компоненты - взвешенного вещества и донных отложений. В биотической компоненте наблюдалось уменьшение K_n от низших звеньев трофической цепи к высшим.

В подразделе 3.6 представлены разработанные соискателем показатели качества морской среды для Севастопольской бухты по экологическому, радиационному и радиационно-гигиеническому критериям – контрольные

уровни содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в морской воде и донных отложениях. Также даны рекомендации по выбору гидробионтов-индикаторов при проведении мониторинговых исследований загрязнения черноморской экосистемы изотопами плутония.

В разделе 4 рассматриваются результаты изучения вертикального распределения удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в кернах донных отложений, отобранных в 4-х боксах Севастопольской бухты и ее внешнего рейда. В профилях донных осадков были выявлены максимумы концентраций изотопов, которые могли сформироваться в период испытаний ядерного оружия в открытых средах (1962 г.) и после аварии на Чернобыльской АЭС (1986 г.). В качестве подтверждения данных гипотез использовали маркер - отношение активностей $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$. В осадочном слое, сформированном в 1986 г. данное отношение, обусловленное залповым поступлением изотопов плутония после аварии на Чернобыльской АЭС, на порядок выше (0,45), чем в слоях, накопившихся в период глобальных (0,03) выпадений радионуклидов. Геохронологическое датирование исследуемых кернов позволило рассчитать изменение линейной (SR) и массовой скоростей осадконакопления (MAR) в разных частях Севастопольской бухты и во внешнем рейде в до- и постчернобыльский периоды. Установлено, что строительство заградительных молов на входе в Севастопольскую бухту привело в пост-чернобыльский период к увеличению скорости осадконакопления в устьевой части бухты, а наращивание дамбы Чернореченского водохранилища - к ее уменьшению в верховье и в средней части бухты. На основании полученных данных сделан вывод о том, что в прибрежных экосистемах, для которых характерны высокие темпы осадконакопления, очищение водных масс от изотопов плутония происходит значительно быстрее, чем в открытой части Черного моря.

В разделе 5 представлены результаты расчетов удельных запасов $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах экосистемы и фактор радиоёмкости (F) донных отложений Севастопольской бухты в период 2016-2021 гг. Оценены

гидрологический, макробиотический и седиментационный потоки элиминации изотопов плутония из водных масс, а также вклад радиоактивного распада. На основании проведенных расчетов сделан вывод, что в экосистеме Севастопольской бухты более 93% от суммарного потока выноса $^{239+240}\text{Pu}$ из воды приходится на биогеохимический седиментационный поток взвешенного вещества. Также в данном разделе представлена геохронологическая реконструкция седиментационных потоков изотопов плутония в донные отложения бухты в рамках ее ранее принятого районирования.

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.

Обоснованность и достоверность результатов. Обоснованность результатов обеспечивается применением общепризнанных статистических и методологических подходов к анализу радиоактивного загрязнения морских экосистем. Выводы по диссертации получены на обширном массиве собственных наблюдений с учетом данных ретроспективного мониторинга. Достоверность и новизна научных результатов подтверждается публикациями в профильных рецензируемых журналах.

Научная и практическая значимость. Полученные результаты позволяют расширить представления о взаимодействии изотопов плутония с биотическими и абиотическими компонентами прибрежных морских экосистем. На основе выявленных закономерностей перераспределения

$^{239+240}\text{Pu}$ в морской среде определены основные биогеохимические процессы, способствующие выведению данного радионуклида из воды. Детальный анализ этих процессов, а также рассчитанные дозовые нагрузки на гидробионтов-индикаторов и контрольные уровни $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях могут быть использованы при создании научно-обоснованной базы экологического нормирования поступления трансурановых элементов в морские акватории и при принятии решений о мерах воздействия в случае радиационных аварий. Впервые проведена оценка влияния гидротехнических сооружений на скорость осадконакопления в Севастопольской бухте с использованием геохронологического метода, основанного на вертикальном распределении ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в профиле донных отложений.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Полученные в работе выводы могут быть использованы при изучении причин и следствий региональных колебаний радиационного загрязнения прибрежных морских акваторий. Радиотрассерный метод оценки скорости осадконакопления с помощью ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ может применяться при планировании строительства гидротехнических сооружений в прибрежных морских акваториях, загрязненных глобальными и чернобыльскими выпадениями.

Вопросы и замечания по диссертации.

1. Основным результатом диссертационной работы является расчет удельных потоков элиминации $^{239+240}\text{Pu}$ из водной толщи Севастопольской бухты ($\text{мБк} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{год}$), которые формируются четырьмя составляющими: гидрологической, седиментационной, макробиотической и радиоактивным распадом (стр. 18, рис. 8 автореферата). Оценка гидрологического потока (выноса) $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольской бухте выполнена по формуле 18, стр. 70 диссертации. В разделе 5.4, стр. 149 диссертации указано, что расчеты проводились с использованием литературных данных о морфометрических параметрах и о периоде замещения вод бухты, а в рамках влияния компонент водного баланса

бухты положительными составляющими являются сток реки Черной, канализационные выпуски, склоновый сток и осадки, а отрицательными – испарения и гидрологический вынос (Егоров, 2018). Однако в диссертации не приводятся морфологические характеристики и данные водного баланса бухты, по которым выполняли расчеты. Было бы целесообразно отразить, какой из источников дает наибольший вклад в поступление растворенной части исследуемого радионуклида в акваторию и сравнить среднегодовой суммарный входящий поток с удельным потоком выноса.

2. В диссертации на стр. 80 приведены результаты расчета величин удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ на сухой вес взвеси в поверхностных водах бухты и доли $^{239+240}\text{Pu}$, аккумулированной на биогенной и литогенной составляющих осадочного вещества (рис. 3.6). Приведена ссылка на работу (Gulin, 2014), где описывается метод оценки биогенной седиментации в Черном море по удельной активности ^{40}K . Так как на основании полученных результатов получены вывод № 6 и защищаемое положение № 1, следовало бы отразить используемый метод расчета в разделе 2 «Материалы и методы».
3. В защищаемом положении 2 указано, что «Аккумулирующая способность биотических компонентов в прибрежных морских акваториях в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ уменьшается с повышением трофического уровня». Однако в главе 3 диссертации не обсуждается и не исследуется аккумулирующая способность как таковая. Рассчитываются и обсуждаются лишь текущие коэффициенты накопления при данных условиях загрязнения изотопами плутония водной среды. Диссертант допускает путаницу понятия «аккумулирующая способность» с понятием «текущего уровня накопления», вызванную неполным пониманием терминов или неточностью изложения текста исследования.
4. Диссертант в подразделах 3.2 и 3.5 использует данные о содержании $^{239+240}\text{Pu}$ в тканях дельфина азовки *P. Phocaena relicta*. По результатам

измерений их концентрация была ниже предела детектирования (подраздел 3.2). Однако в подразделе 3.5 коэффициент накопления обозначен величиной <10 единиц и использован для анализа состояния Севастопольской бухты. Следует указать, что дельфины не являются сколь-нибудь постоянными обитателями бухты, а ареал их миграции весьма широк. Данные о загрязнении плутонием одной особи дельфина азовки некорректно интерпретировать как высшее трофическое звено биоты Севастопольской бухты в данном анализе.

5. В работе (глава 3) рассчитанные диссертантом уровни загрязнения и коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ не сравнивали с уровнями, рекомендованными Международным агентством по атомной энергии (IAEA, 1985) или данными из других литературных источников по Черному морю. Это затрудняет интерпретацию полученных автором результатов и выводов.
6. На странице 18 автореферата употребляется термин «косное» вещество, а в скобках дается расшифровка, что под ним подразумевается поток литогенной составляющей осадочного вещества. В соответствии с учением В.И. Вернадского о биосфере косное вещество (абиотическое) образовано без участия живых организмов (вода, песок, минералы), в то же время в настоящей работе исследованы взвесь и донные отложения, которые представляют собой биокосные вещества.
7. В разделе 4 на основе геохронологического датирования по ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ были определены линейные (SR) и массовые (MAR) скорости осадконакопления в разных боксах Севастопольской бухты, а также проведен ретроспективный анализ этих показателей в до- и постчернобыльский период. Однако использованный метод хронологических расчетов неизбежно предопределяет линейность скорости осадконакопления между двумя реперными слоями на протяжении длительных временных промежутков. Сопоставимы ли SR и MAR с данными по Черному морю, рассчитанными с помощью других

методов датирования, например, по природному ^{210}Pb или антропогенному ^{137}Cs ?

8. Автореферат в целом соответствует тексту диссертации. В то же время следует отметить, что автореферат изложен в лингвистически сложном стиле, с упущениями важных для понимания сути работы элементов, которые содержатся в тексте диссертации. В частности не приводится указанная в подразделе 3.2 (стр. 12) линейная зависимость удельной активности плутония от размерных характеристик раковин мидий; не указано количество особей отдельных гидробионтов, использованных для расчета коэффициентов накопления и корреляционных связей. Отмеченные недостатки осложняют восприятие работы.

Отметим, что вышеуказанные неточности в целом не снижают общую положительную оценку диссертационной работы Параскива А. А. имеющую важное научное и прикладное значение.

Заключение. Диссертация выполнена на достаточно хорошем научном уровне и представляет собой законченный этап исследований по актуальной теме. Получены новые результаты, развивающие и углубляющие современные представления об аккумулирующей способности изотопов плутония биотическими и абиотическими компонентами прибрежной морской экосистемы, их биологическом влиянии на массовые виды гидробионтов Севастопольской бухты, а также основных механизмах, определяющих самоочищение вод от ионизирующего излучения $^{239+240}\text{Pu}$. Полученные результаты будут полезны при создании научно-обоснованной базы данных о текущем радиозэкологическом статусе хозяйственно освоенных участков черноморского побережья, востребованной при принятии решений в случае радиационных инцидентов.

Диссертационная работа Параскива Артема Алексеевича «Процессы формирования самоочищения природных вод в отношении радиоизотопов плутония $^{239+240}\text{Pu}$ в прибрежных морских акваториях», соответствует требованиям пунктов 9-10 Положения о присуждении ученых степеней,

утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор заслуживает присуждения учёной степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.16 – гидробиология.

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником Федерального государственного бюджетного учреждения науки Мурманского морского биологического института Российской академии наук (ММБИ РАН) кандидатом географических наук Усягиной Ириной Сергеевной.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден и утвержден на расширенном научном семинаре лаборатории океанографии и радиозэкологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Мурманского морского биологического института Российской академии наук, протокол № 1 от « 25 » сентября 2023 года.

Ведущий научный сотрудник
лаборатории океанографии и радиозэкологии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Мурманского морского биологического института
Российской академии наук,
кандидат географических наук
Усягина Ирина Сергеевна

Заведующий лабораторией океанографии и радиозэкологии
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Мурманского морского биологического института
Российской академии наук,
кандидат географических наук
Ильин Геннадий Васильевич

Сведения о ведущей организации: Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки Мурманский морской биологический институт
Российской академии наук (ММБИ РАН)
183038, г. Мурманск, ул. Владимирская, д.17, Россия
Приемная-(8152)25-39-63, факс-(8152)25-39-94
Электронная почта: mmbi@mmbi.info
Сайт: <https://www.mmbi.info>

Подписи Г.В. Ильина и И.С. Усягиной заверяю.

Ученый секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения
науки Мурманского морского биологического института Российской
академии наук, кандидат химических наук
Касаткина Надежда Евгеньевна

« 25 » сентября 2023 года

