

УДК 574.632:551.464.679(282.247.345)

СОДЕРЖАНИЕ $^{239+240}\text{Pu}$ В КОМПОНЕНТАХ ЭКОСИСТЕМЫ РЕКИ ЧЕРНОЙ И ОЦЕНКА ЕГО ВЫНОСА В СЕВАСТОПОЛЬСКУЮ БУХТУ

Параскив А.А., Проскурнин В.Ю., Малахова Л.В.

Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН, Севастополь,

e-mail: paraskiv@ibss-ras.ru

Впервые определено содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, гидробионтах и донных отложениях реки Черной. Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ в воде устьевое участка реки составила $2,82 \pm 0,23$ и $3,8 \pm 0,31$ мБк/м³ в зимний и летний сезоны соответственно и была выше таковой в среднем течении реки в 2 и 6 раз соответственно. Расчетным методом определена объемная активность $^{239+240}\text{Pu}$ во взвешенной форме в воде устьевое района реки, которая составляла 0,73 мБк/м³ и 1,56 мБк/м³ в зимний и летний периоды года, что составило от 26 до 41 % от суммарной активности $^{239+240}\text{Pu}$ соответственно. В воде реки содержание $^{239+240}\text{Pu}$ не превысило нормы радиационной безопасности РФ. В двух районах реки определены коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$ гидрорастениями и моллюсками. Наибольшие коэффициенты накопления $^{239+240}\text{Pu}$, достигающие величин $n \times 10^3$, определены у водного растения поручейника *Sium sisaroides* (DC, 1830). Во всех точках отбора донных отложений удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ была практически одинаковой. Отношение радиоизотопов $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, свидетельствует о едином источнике поступления плутония в исследуемых районах, как в воде, так и в грунтах – глобальных радиоактивных выпадениях. Проведена оценка выноса $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольскую бухту с потоком реки Черной. Показано, что практически весь плутоний, попадающий в Севастопольскую бухту с водами реки Черной, перераспределяется в ее донные отложения.

Ключевые слова: $^{239+240}\text{Pu}$, вода, гидробионты, донные отложения, река Черная, Севастопольская бухта, Крым

THE CONTENT OF $^{239+240}\text{Pu}$ IN ECOSYSTEM COMPONENTS OF THE CHERNAYA RIVER AND ITS INFLUX TO THE SEVASTOPOL BAY

Paraskiv A.A., Proskurnin V.Yu., Malakhova L.V.

A.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Sea of RAS, Sevastopol,

e-mail: paraskiv@ibss-ras.ru

The content of $^{239+240}\text{Pu}$ in water, hydrobionts and bottom sediments of the Chernaya River was determined for the first time. $^{239+240}\text{Pu}$ activity concentration in water of the river mouth area was 2.82 ± 0.23 and 3.8 ± 0.31 mBq/m³ in the winter and summer seasons, respectively, and it was 2 and 6 times higher than that in the river middle course area. $^{239+240}\text{Pu}$ activity concentration in suspended form in water of the river mouth area was calculated: 0.73 and 1.56 mBq/m³ in the winter and summer seasons, which amounted from 26 to 41 % of the total $^{239+240}\text{Pu}$ activity respectively. The content of $^{239+240}\text{Pu}$ in the river water did not exceed the Russian Federation radiation safety standards. $^{239+240}\text{Pu}$ concentration factors for hydrophytes and mollusks were determined in two river areas. The highest $^{239+240}\text{Pu}$ concentration factors, reaching values of $n \times 10^3$, were found for aquatic plant *S. sisaroides*. $^{239+240}\text{Pu}$ activity concentration at all bottom sediments sampling stations was almost the same. $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ activity ratio indicates the same source of plutonium input to the studied areas, both for water and for bottom sediments – global radioactive fallout. $^{239+240}\text{Pu}$ influx from the Chernaya River to the Sevastopol Bay was estimated. It was shown that almost all plutonium entering the Sevastopol Bay with the Chernaya River waters is redistributed into its bottom sediments.

Keywords: $^{239+240}\text{Pu}$, water, hydrobionts, bottom sediments, Chernaya River, Sevastopol Bay, Crimea

Появление техногенных радиоизотопов плутония на Земле в середине XX в. связано с использованием их человеком в военных и мирных целях. Радиоизотопы плутония $^{239+240}\text{Pu}$ являются альфа-излучающими изотопами, альфа-частицы которых обладают высокой энергией (5,15–5,16 МэВ), вследствие чего эти изотопы обладают значительной радиотоксичностью, а их длительные периоды полураспада обуславливают тот факт, что, попадая в природные водоемы, они накапливаются в их компонентах, включаясь в биогеохимические циклы. Источниками поступления плутония в окружающую среду являлись испытания ядерного оружия (92 %), промышленная переработка отработавшего ядерного топлива (7 %), радиационные аварии и бортовые источники

энергии сгоревших космических аппаратов. После испытаний ядерного оружия плутоний выпадал на поверхность земли и океана в виде аэрозольных и дождевых осадков. Высокие сорбционные свойства плутония ограничивают миграционную способность этих радионуклидов, в воде пресноводных водоемов более 90 % плутония находится во взвешенной форме. Большую роль в поступлении радионуклидов в речную воду играет загрязнение из водосборного бассейна в периоды весенних паводков и летних и осенних сезонов дождей за счет выщелачивания изотопов и эрозии почвы [1]. Ремобилизация плутония из почв сельскохозяйственных районов оценивалась в 0,05 % запасов на водосборе в год и 0,005 % – для дренажа почвенного покрова лесов, время нахождения

ния плутония на водосборных территориях варьировалось от 10^3 до $2 \cdot 10^4$ лет. Имеются данные, что в воде р. Рона на юго-западе Франции, куда попадали стоки завода по переработке отработанного ядерного топлива в г. Маркуль, содержание большинства антропогенных радионуклидов за два последних десятилетия снизилось, при этом уровни именно трансурановых радионуклидов отмечались выше, чем в сопредельных речных экосистемах, не имеющих дополнительных источников их поступления [2]. Для полуострова Крым основными источниками поступления радиоизотопов плутония являются глобальные радиоактивные выпадения после испытаний ядерного оружия в открытых средах, а также авария на Чернобыльской АЭС [3].

Река Черная, являющаяся основным источником водоснабжения населения города Севастополя, относится к западной группе крымских рек, берет начало у подножья Крымской Яйлы, на высоте 280 м над уровнем моря. В месте выхода из гор средний годовой расход ее равен $2,5 \text{ м}^3/\text{с}$, далее он уменьшается, вследствие забора воды на орошение, вблизи устья составляет $0,9 \text{ м}^3/\text{с}$. В Байдарской долине сток реки и её притоков – малых рек, зарегулирован созданием больших и малых водохранилищ и прудов, как для орошения, так и для водоснабжения населенных пунктов. В центре долины на реке построено самое крупное

в Крыму водохранилище – Чернореченское, объемом $64,2 \text{ млн м}^3$. В пределах Байдарской долины река Черная принимает основные свои притоки, берущие начало на северных склонах Ай-Петринской яйлы. Река впадает в верховье Севастопольской бухты, при этом в зоне смешения речной и морской воды образуется естественный квазистационарный эстуарий [4].

Изучение содержания и распределения техногенных радионуклидов плутония в экосистеме реки Черной до настоящего времени не проводили. Этот вопрос представляет несомненный интерес, поскольку загрязненность окружающей среды антропогенными радионуклидами, в том числе изотопами плутония, в настоящее время является неустраняемым явлением, учитывая уже поступившие объемы радиоактивных элементов в окружающую среду и новые поступления с функционирующих ядерных производств, АЭС и периодически случающихся ядерных инцидентов на Земле.

Целью работы являлось определение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в компонентах экосистемы реки Черной и оценка его выноса в Севастопольскую бухту.

Материалы и методы исследования

Пробы воды, гидробионтов и донных отложений отбирали в феврале и июне 2020 г. Схема станций отбора проб приведена на рис. 1.

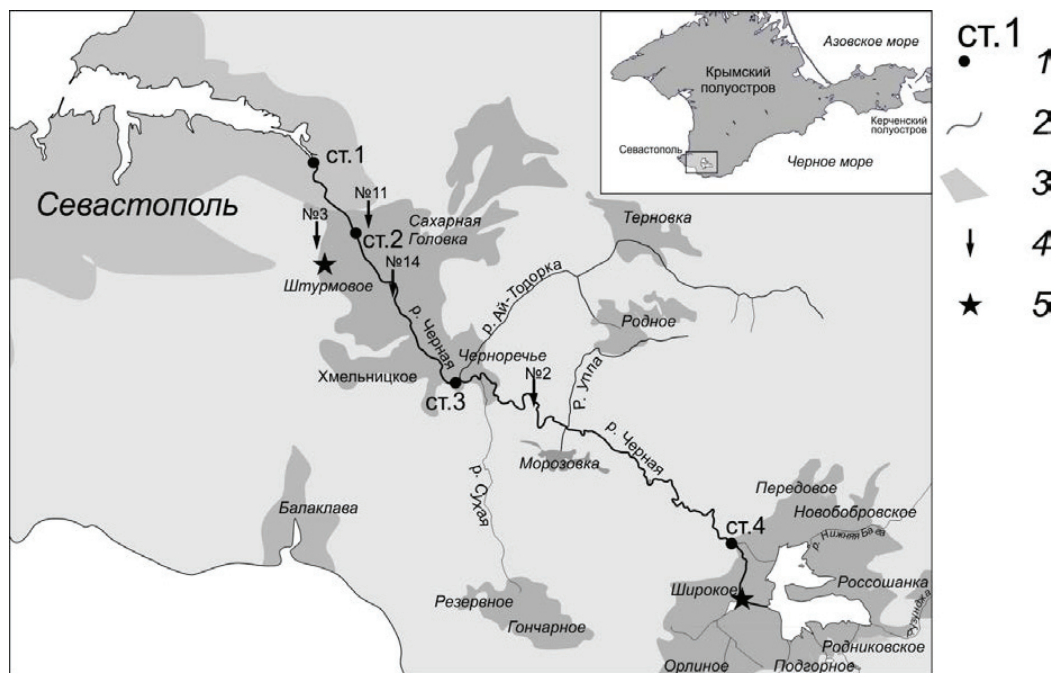


Рис. 1. Схема станций отбора проб на реке Черной.
Обозначения: 1 – место отбора проб и номер станции, 2 – русло рек,
3 – контуры населенных пунктов, 4 – гидроузлы на реке Черной, 5 – очистные сооружения

Пробы воды объемом 1000 л отбирали в феврале и июне 2020 г. в трех точках нижнего и среднего течения реки Черной: в устьевой части в районе смешения речной и морской воды (ст. 1), у с. Хмельническое (ст. 3) и в Байдарской долине (ст. 4). Пробо-подготовка воды для определения объемной активности радионуклидов плутония включает этап его концентрирования из большого объема методом многократного соосаждения их с двумя видами сорбентов: трехкратного переосаждения с MnO_2 и двукратного переосаждения с $Fe(OH)_3$, что позволяло сконцентрировать определяемые изотопы, уменьшив объем проб с 1000 л до 100–150 мл.

Для оценки уровня накопления $^{239+240}Pu$ гидробионтами были отобраны пробы зеленой водоросли *Cladophora laetevirens* (Kütz-ling, 1843) и двустворчатых моллюсков – мидий *Mytilus galloprovincialis* (Lamarck, 1819) в устьевой части реки Черной на ст. 1. Для сравнительной оценки на ст. 3 были взяты пробы водного растения поручейника сизаровидного *Sium sisaroides* (DC, 1830), растущего в русле реки. Пробы водорослей, моллюсков и растений высушивали, озоляли в муфельной печи при $550^\circ C$, затем их гомогенизировали и отбирали аликвоты для анализа.

Пробы донных отложений (верхний 0–5 см слой) отбирали на ст. 1 в феврале 2020 г, на ст. 2–4 – в июне 2020 г. Пробы высушивали в сушильном шкафу, гомогенизировали, отбирали аликвоту для дальнейшего анализа и озоляли в муфельной печи при $500^\circ C$.

Озоленные пробы биоты и донных отложений подвергались двукратному кислотному выщелачиванию на водяной бане, а затем, наряду со сконцентрированными пробами воды, двуступенчатой ионообменной очистке. Полученные элюаты проб осаждали на диски из нержавеющей стали методом электролиза, подготавливая таким образом счетные образцы для альфа-спектрометрии. Более подробно методика радиохимической подготовки описана в работе [3].

Счетные образцы измерялись на альфа-спектрометрическом комплексе фирмы «ORTEC» (США) в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН на базе Института геологии и минералогии СО РАН. Для оценки химического выхода плутония перед началом радиохимической подготовки во все пробы вносили определенное количество эталонного раствора ^{242}Pu в качестве внутреннего стандарта. Результаты определения объемной активности $^{239+240}Pu$ в пробах воды представлены в МБк/м³, удельной активности $^{239+240}Pu$ в пробах гидробионтов – в МБк/кг сырого веса, а в пробах донных отложений – в МБк/кг сухого веса пробы.

Оценка выноса плутония с потоком реки Черной $R_{^{239+240}Pu}$ в Севастопольскую бухту выполнена по формуле (1) в соответствии с руководством [5]:

$$R_{^{239+240}Pu} = C_{^{239+240}Pu} \cdot W, \quad (1)$$

где $C_{^{239+240}Pu}$ – объемная активность радиоизотопов $^{239+240}Pu$ (МБк/м³), определенная в 2020 г.; W – месячный или среднегодовой объем стока (м³) на основании расходов воды по гидропосту с. Хмельническое – р. Черная в 2020 г.

Результаты исследования и их обсуждение

Химический состав реки Черной формируется под влиянием физико-географических и метеорологических условий западного склона Крымских гор и Байдарской долины, где протекает речной поток. Многолетние исследования показали, что вода реки является слабощелочной, гидрокарбонатно-кальциевой, общая минерализация изменяется от 0,3 до 0,5 г/л. Значения солёности воды на ст. 1 показали, что в этом районе происходило смешение речной и морской воды (табл. 1).

$^{239+240}Pu$ в воде реки Черной. Результаты анализа объемной активности $^{239+240}Pu$ в воде реки Черная представлены в табл. 1.

Таблица 1

Объемная активность $^{239+240}Pu$ в воде реки Черная в 2020 г.

№ станции	Дата отбора	Соленость, ‰	$^{239+240}Pu \pm \sigma$, МБк/м ³	$^{238}Pu \pm \sigma$, МБк/м ³	$^{238}Pu/^{239+240}Pu$
1	18.02.2020	12,3	$2,82 \pm 0,23$	$0,10 \pm 0,05$	$0,036 \pm 0,02$
4	19.02.2020	0	$1,3 \pm 0,22$	н.п.д.*	н.д.**
1	09.06.2020	15,4	$3,8 \pm 0,31$	$0,09 \pm 0,06$	$0,023 \pm 0,017$
3	10.06.2020	0	$0,64 \pm 0,1$	н.п.д.	н.д.

Обозначение: * – ниже предела обнаружения, ** – нет данных.

Таблица 2

Уровни вмешательства по содержанию $^{239+240}\text{Pu}$ в питьевой воде [6] и контрольные уровни содержания радионуклидов в морских водах [7] в сравнении с фактической объемной активностью в воде р. Черной

Уровень вмешательства, Бк/л	Контрольный уровень по радиационно-экологическому критерию, Бк/л	Контрольный уровень по экологическому критерию, Бк/л	Фактическая объемная активность, Бк/л
$5,5 \times 10^{-1}$	$6,13 \times 10^{-2}$	$1,7 \times 10^0$	$0,64 - 3,8 \times 10^{-6}$

Таблица 3

Объемная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в воде реки Черная в сравнении с реками, которые в разной степени подвергались радиационному загрязнению

Река	Годы отбора	Объемная активность $^{239+240}\text{Pu}$, мБк/м ³	Источник
Теча	1990–1996	123–520	[8]
Рона	2011–2017	$1,2 \pm 0,8$	[2]
Висла	2002–2004	$2,22 \pm 0,4 - 10,33 \pm 1,69$	[9]
Черная	2020	$0,64 \pm 0,1 - 3,8 \pm 0,31$	настоящее исследование

Содержание радионуклидов в питьевой воде в Российской Федерации регламентируется величинами уровней вмешательства согласно Нормам радиационной безопасности [6], а контрольные уровни радионуклидов в воде – рекомендательным документом Росгидромета [7] (табл. 2). Последние разработаны для морских вод, однако мы можем руководствоваться ими, рассматривая ст. 1, так как соленость 12,3–15,4 ‰ свидетельствует о преобладании соленых морских вод в зоне впадения реки Черная в Севастопольскую бухту в момент отбора проб.

Исходя из данных, представленных в табл. 2, можно заключить, что в настоящее время объемная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в водах реки Черная находится на 4–6 порядков величины ниже всех нормативных значений, принятых в РФ.

Для определения источников поступления плутония в экосистему реки Черной определено изотопное отношение $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$, которое отличается на порядок для каждого источника радиоактивного загрязнения: в глобальных выпадениях отношение активностей $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ равно 0,026–0,036, в чернобыльских – 0,4–0,5, так как относительное количество ^{238}Pu в реакторном плутонии выше, чем в оружейном [3]. Из данных, приведенных в табл. 2, по отношению $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ можно судить о доле чернобыльских радионуклидов в общем их содержании в воде реки Черной на ст. 1, которая свидетельствует о глобальных выпадениях, как об основном источнике поступления плутония в акваторию реки.

Проведена сравнительная оценка содержания радиоизотопов плутония в воде реки Черной с водами реки Теча (РФ, Челябинская обл.), в воды которой в 1950-е гг. сбрасывались высокоактивные отходы, реки Рона (Франция), на которой расположены 5 АЭС, а также завод по переработке радиоактивных отходов, и реки Висла (Польша), основными источниками радиоактивного загрязнения которой, так же как и реки Черной, являлись атмосферные выпадения после испытаний ядерного оружия в открытых средах и авария на Чернобыльской АЭС (табл. 3).

Данные, представленные в табл. 3, свидетельствуют о том, что содержание $^{239+240}\text{Pu}$ в водах реки Черной находится на уровне, характерном для рек, имеющих значительно большие водосборные бассейны (Рона и Висла). Однако значения объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в реке Черной на несколько порядков величин меньше таковых, наблюдавшихся в реке Теча спустя 40 лет после сброса в нее высокоактивных отходов.

$^{239+240}\text{Pu}$ в гидробионтах. В зеленой водоросли кладофоре удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ на ст. 1 составляла $0,88 \pm 0,01$, в ручейнике на ст. 3 – $0,64 \pm 0,08$ мБк/кг сырой массы.

Наряду с водорослями и растениями в качестве удобных биоиндикаторов уровней загрязненности использовали животных, в частности беспозвоночных – средиземноморских мидий. На ст. 1 в зоне смешения морских и речных вод удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ в створках мидий составляла $0,47 \pm 0,34$ мБк/кг сырой массы. Ранее было

показано, что в процентном отношении накопление плутония в мидиях составило 92,6% в створках и 7,4% – в мягких тканях [10]. Таким образом, большая часть накопленного плутония не мигрирует по трофической цепи, а депонируется в створках мидий и остается при их отмирании в донных осадках водоёма.

Для изученных видов биоты были рассчитаны значения коэффициентов накопления плутония как основного показателя, характеризующего аккумуляционную способность каждого вида в отношении рассматриваемых антропогенных радионуклидов (рис. 2). Значения коэффициентов накопления, представленные на рис. 2, свидетельствуют о том, что, несмотря на практически одинаковую удельную активность, поручейник обладает более высокой накопительной способностью в отношении плутония, чем зеленые водоросли и раковины мидий.

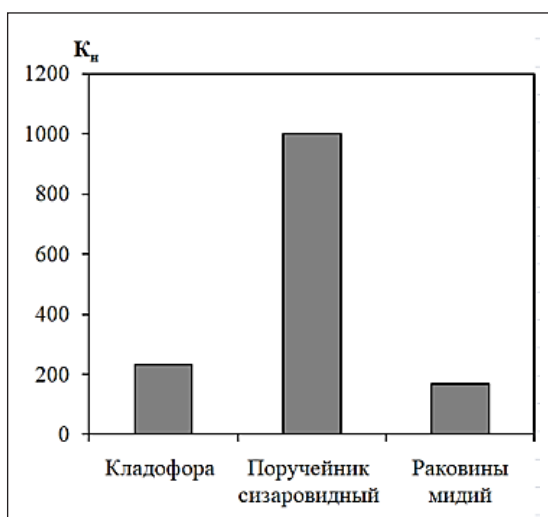


Рис. 2. Коэффициенты накопления ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в гидробионтах реки Черной

²³⁹⁺²⁴⁰Pu в поверхностном слое донных отложений. Результаты определения удельной активности ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в поверхностном

0–5 см слое донных отложений реки Черной представлены в табл. 4.

Из данных, представленных в табл. 4, видно, что удельная активность ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в верхнем 0–5 см слое донных отложений практически одинакова на всех станциях отбора в реке Черная. Стоит отметить, что ранее было показано увеличение удельной активности плутония в 0–5 см слое донных отложений Севастопольской бухты, начиная от места впадения в нее реки Черной (276 ± 53 мБк/кг) до ее устьевой части (993 ± 53 мБк/кг) [11].

Известно, что в морских и пресноводных экосистемах плутоний проявляет ярко выраженные педотропные свойства, т.е. связывается со взвешенным веществом и накапливается в донных отложениях водоема [1, 3]. Это согласуется с полученными нами данными о более высоком содержании ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в донных отложениях, чем в воде и биоте реки Черной. Так, донные отложения реки Черная обладают наибольшими коэффициентами накопления плутония (n×10⁵) по сравнению с гидробионтами.

Отношение активностей ²³⁸Pu/²³⁹⁺²⁴⁰Pu в донных осадках изменялось от 0,076 на ст. 1 до 0,300 – на ст. 2. Такое существенное отличие может быть связано с пятнистостью чернобыльских выпадений. В целом отношение изотопов Pu показывает, что в донных отложениях, как и в воде, основным источником поступления плутония являлись глобальные выпадения.

Оценка выноса ²³⁹⁺²⁴⁰Pu со стоком реки Черной в Севастопольскую бухту. Сравнение водности реки в 2020 г. с многолетними данными с 1961 по 2007 г. показало, что 2020 г. являлся маловодным, средний годовой расход воды реки Черной в 2020 г. по данным Крым УГМС составил 1,16 м³/сек. Исходя из полученных значений объемной активности ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в воде реки в 2020 г. на разных станциях отбора, рассчитали годовой сток плутония по формуле (1). Диапазон значений составил от 23 до 121 кБк/год.

Таблица 4

Удельная активность ²³⁹⁺²⁴⁰Pu в 0–5 см слое донных отложений реки Черной в 2020 г.

№ станции	Дата отбора	²³⁹⁺²⁴⁰ Pu ± σ, Бк/м ³	²³⁸ Pu ± σ, мБк/м ³	²³⁸ Pu/ ²³⁹⁺²⁴⁰ Pu
1	18.02.2020	206 ± 13	16 ± 6	0,076 ± 0,030
2	09.06.2020	199 ± 15	60 ± 9	0,300 ± 0,050
3	09.06.2020	199 ± 24	н.п.д.	н.д.
4	10.06.2020	266 ± 26	30 ± 12	0,113 ± 0,045

Следует учесть, однако, что на ст. 1, в зоне впадения реки в бухту, во время пробоотбора наблюдалось преобладание морских вод, исходя из данных по определению солёности (табл. 1). Поэтому значение 121 кБк/год, рассчитанное по средней объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в феврале и июне, может давать завышенную оценку.

Как было сказано выше, радионуклиды плутония характеризуются большой сорбционной способностью и активно связываются со взвешенным веществом. Параллельно с отбором проб воды для определения $^{239+240}\text{Pu}$ выполнялось определение количества общего взвешенного вещества в воде. Для ст. 1 в зимний период концентрация взвешенного вещества в воде составляла $3,56 \text{ г/м}^3$, а в летний – $7,6 \text{ г/м}^3$. Повышенное содержание взвешенного вещества в летний период может объяснять более высокие значения объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в этот период. Исходя из близких значений коэффициентов накопления плутония в донных отложениях и взвешенном веществе [12], можно принять, что удельная активность $^{239+240}\text{Pu}$ во взвешенном веществе приблизительно равна его удельной активности в донных отложениях. При таком условии расчетное значение объемной активности $^{239+240}\text{Pu}$ во взвешенной форме составляло $0,73 \text{ МБк/м}^3$ и $1,56 \text{ МБк/м}^3$ в зимний и летний периоды года соответственно. Таким образом, доля плутония во взвешенном веществе на ст. 1 находилась в диапазоне от 26 до 41 %.

Это обуславливает тот факт, что максимальное значение выноса $^{239+240}\text{Pu}$ с водами реки Черной (121 кБк/год), вероятно, может быть меньше на 41 %. В целом условия, наблюдающиеся в зоне смешения речных и морских вод, носят сложный характер и требуют дополнительного изучения для понимания процессов перераспределения радионуклидов плутония в системе вода – взвешенное вещество – донные отложения в таких условиях.

Однако даже завышенная оценка среднегодового выноса $^{239+240}\text{Pu}$ с водами реки Черная в Севастопольскую бухту, по всей видимости, вносит лишь небольшой вклад в содержание плутония в экосистеме бухты. Ранее рассчитанный седиментационный поток $^{239+240}\text{Pu}$ в донные отложения Севастопольской бухты составил $8,18 \text{ МБк/год}$ [13]. Если принять условие стационарности выноса $^{239+240}\text{Pu}$ с потоком реки Черной, то в год он составит 1,48 % от годового седиментационного потока плутония в Севастопольской бухте. Такое соотношение показывает, что все количество плутония, поступающее со стоком реки, может быть депонировано в грунтах бухты за счет седиментацион-

ного потока. Факт незначительности потока выноса плутония с водами реки Черная подтверждается данными об увеличении удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ в поверхностных донных отложениях в Севастопольской бухте от ее верховья к выходу в открытое море, упомянутый выше [11]. Наблюдавшееся увеличение, по-видимому, связано с «разбавлением» седиментационных потоков в зоне воздействия речных вод взвесями, обедненными плутонием по сравнению с потоками вещества, привносимыми в бухту из открытой части моря.

Заключение

Впервые было проведено определение содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде, гидробионтах и донных отложениях реки Черной. В природе аналогов изучаемых радиоизотопов нет, они являются индикаторами техногенного загрязнения реки. Поскольку активных источников $^{239+240}\text{Pu}$ на водосборной площади реки нет, то появление этих изотопов в компонентах экосистемы реки Черной является откликом экосистемы реки на загрязнение из отдаленных во времени и пространстве источников, к которым относятся глобальные радиоактивные выпадения после испытаний ядерного оружия и чернобыльская авария. По величине содержания $^{239+240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях по сравнению со средним течением реки более техногенно нагруженной вода оказалась в устьевом участке. По отношению к уровням вмешательства для питьевой воды, установленным нормами радиационной безопасности РФ, в воде реки не отмечено превышения нормативных значений, что свидетельствует о высоком качестве воды одного из основных ресурсов питьевого водоснабжения г. Севастополя в отношении изучаемых радионуклидов. Однако даже такие невысокие концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ в воде приводят к заметному накоплению в гидробионтах, обитающих в экосистеме реки. В двух районах реки определены уровни накопления $^{239+240}\text{Pu}$ водорослями, растениями и створками моллюсков. Наибольшие Кн плутония среди изученных представителей биоты, достигающие $n \times 10^3$, оказались у водного растения поручейника.

Наибольшие величины удельной активности $^{239+240}\text{Pu}$ среди компонент экосистемы реки Черной определены в поверхностном 0–5 см слое донных отложений. При этом они были практически одинаковы на всех станциях отбора. Этот факт, а также отношение радионуклидов $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$, свидетельствует о едином источнике плутония в исследуемых районах – глобальных радиоактивных выпадениях.

Определен вынос $^{239+240}\text{Pu}$ в Севастопольскую бухту с потоком реки Черной. Показано, что весь плутоний, привносимый в бухту с речным стоком, может элиминироваться из водной массы бухты за счет седиментационных потоков.

Работа выполнена в рамках темы НИР ФИЦ ИнБЮМ «Молисмологические и биогеохимические основы гомеостаза морских экосистем» (1210315005-8) и регионального гранта РФФИ и города Севастополя 20-45-920004 р-а «Балансовое изучение влияния стока реки Черной на эвтрофикацию и загрязнение Севастопольской бухты антропогенными радионуклидами, тяжёлыми металлами и хлорорганическими ксенобиотиками».

Авторы благодарят Мильчакову Н.А. и Александрова В.В. за определение видов гидрорифтов, Сидорова И.Г. и Мосейченко И.Н. за помощь в отборе проб.

Список литературы

1. Трапезникова В.Н., Трапезников А.В. Радиоэкология пресноводных экосистем как научная дисциплина // Вопросы радиационной безопасности. 2006. № 1. С. 35–58.
2. Eyrolle F., Lepage H., Antonelli C., Morereau A., Cossonnet C., Boyer P., Gurriaran R. Radionuclides in waters and suspended sediments in the Rhone River (France)-Current contents, anthropic pressures and trajectories. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 723. P. 137873.
3. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыгугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. Радиоэкологический отклик Чёрного моря на чернобыльскую аварию. Г.Г. Поликарпов, В.Н. Егоров – ред. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 667 с.
4. Овсяный Е.И., Орехова Н.А. Гидрохимический режим реки Черной (Крым): экологические аспекты // *Морской гидрофизический журнал*. 2018. Т. 34. № 1 (199). С. 82–94.
5. Временные методические рекомендации по расчету выноса органических, биогенных веществ, пестицидов и микроэлементов речным стоком. М.: Гидрометеоздат, 1983. 32 с.
6. СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009).
7. P52.18.852-2016 «Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах» Министрство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Роскомгидромет, Обнинск, 2016. 26 с.
8. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем, Т. I. Екатеринбург: Изд-во «АкадемНаука2», 2014. 496 с.
9. Bogdan S., Jahnz-Bielawska A., Strumińska-Parulska D.I. The inflow of ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ from the Vistula River catchment area to the Baltic Sea. *Journal of environmental radioactivity*. 2011. Vol. 102. Iss. 8. P. 728-734. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.03.017>.
10. Терещенко Н.Н. Плутоний в гидробионтах Чёрного моря // *Наукові праці: науково-методичний журнал. Техногенна безпека*. 2013. Т. 210. № 198. С. 52–60.
11. Терещенко Н.Н., Проскурнин В.Ю., Гулин С.Б., Крылова Т.А. Радиоэкологический мониторинг плутония в донных отложениях севастопольских бухт // *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. 2013. Вып. 27. С. 289–293.
12. Proskurnin V.Yu., Tereshchenko N.N., Paraskiv A.A., Chuzhikova-Proskurnina O.D. Plutonium and americium in the deep Black Sea bottom sediments // *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 229-230. Article no. 106540 (9 p.). DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106540.
13. Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Л.В., Мирзоева Н.Ю., Поповичев В.Н., Терещенко Н.Н., Лазоренко Г.Е., Плотичина О.В., Малахова Т.В., Проскурнин В.Ю., Сидоров И.Г., Стецюк А.П., Гулина Л.В. Нормирование качества вод Севастопольской бухты по потокам депонирования загрязняющих веществ в донные отложения // *Водные ресурсы*. 2018. Т. 45. № 2. С. 188–195. DOI: 10.7868/S0321059618020086.