УДК:546.798.22(262.5)

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ АЛЬФА-РАДИОНУКЛИДОВ ПЛУТОНИЯ В СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЕ

Н. Н. Терещенко, В. Н. Егоров, С. Б. Гулин, В. Ю. Проскурнин, А. А. Параскив, И. Г. Сидоров, Т. А. Крылова, И. Н. Мосейченко

Институт морских биологических исследований им. А. О. Ковалевского РАН, Севастополь, РФ, ntereshchenko@yandex.ru

В работе представлено пространственное и вертикальное распределение альфа-радионуклидов плутония $^{239+240}$Pu и ^{238}Pu в донных отложениях Севастопольской бухты. Выполнена оценка параметров биогеохимической миграции плутония и вклада разных путей элиминации $^{239+240}$Pu в самоочищение толщи вод бухты от загрязнения плутонием.

Ключевые слова: Чёрное море, Севастопольская бухта, $^{239+240}$Pu, вертикальное и пространственное распределение, седиментационные потоки, пути элиминации $^{239+240}$Pu из водных масс бухты

В постчернобыльский период основными дозообразующими техногенными радиоизотопами в экосистемах Чёрного моря определены долгоживущие изотопы ^{137}Cs, ^{90}Sr и альфа-радиоизотопы плутония (^{239,240}Pu) [1].

Барьерная роль водоёма характеризуется величиной фактора радиоёмкости, который указывает на долю радионуклида, аккумулируемого донными осадками из водной толщи. Как было показано ранее [2], в Чёрном море для илистых донных отложений фактор радиоёмкости для $^{239+240}$Pu достигает 98 % для шельфовых районов, что указывает на донные отложения как на основное депо плутония в черноморских экосистемах. Это обуславливает повышенный интерес к изучению процессов миграции плутония в прибрежных акваториях, полузакрытых и закрытых бухтах, используемых в хозяйственной и рекреационной деятельности и зачастую заиленных.

Самой большой и широко используемой бухтой, находящейся в черте города Севастополя, является Севастопольская бухта, поэтому важно изучить радиоэкологические параметры перераспределения радионуклидов плутония как основных техногенных дозообразующих альфа-радионуклидов в донных отложениях этой бухты и оценить вклад разных процессов в экосистеме в миграцию плутония.

Целью нашей работы было определение концентрационной активности $^{239+240}$Pu и ^{238}Pu в донных отложениях Севастопольской бухты и её пространственное и вертикальное распределение в осадках для оценки биогеохимических параметров миграции Pu и вклада различных процессов в перераспределение его радиоизотопов в экосистеме бухты.

Материал и методы. Исследования выполнены в 2007–2013 гг. в Севастопольской бухте (рис. 1). Донные отложения отбирали акриловыми колонками с вакуумным затвором для отбора осадков и анализировали верхний слой 0–5 см, а также колонки высотой 15–20 см, которые нарезали на послойные пробы с высотой слоя 1 см для определения биогеохимических параметров седиментационных процессов.

Для определения уровней концентрационной активности $^{239+240}$Pu в природных образцах использовали метод, который позволяет определять радионуклиды плутония не только в донных отложениях, но и в морской воде, а также в гидробионтах. Его принцип заключается в проведении следующих процедур: термическая предобработка проб, использование в качестве радиотрассера для определения выхода плутония ра-

диоизотопа ^{242}Pu, химическая обработка проб, радиохимическое выделение плутония из проб донных отложений и их дальнейшая очистка при помощи колоночной хроматографии с применением анионообменных смол. Затем следует изготовление тонкослойных альфа-препаратов путем электроосаждения плутония, с последующей его термофиксацией на стальных дисках и измерение препаратов на альфа-спектрометрическом комплексе [1]. Ошибка определения концентрационной активности $^{239+240}$Pu в донных отложениях не превышала 13 %, а в воде и гидробионтах – 20 %. Ошибка определения ^{238}Pu из-за низких уровней концентрационной активности изменялась от 10 до 80 %.

Результаты и обсуждение. Станции выбирали согласно биогеохимическому делению акватории бухты на районы, отличающиеся гидрологическим и гидрохимическим режимом [3]. Концентрационная активность радионуклидов плутония не превышала 1 Бк/кг сухой массы осадка и изменялась в диапазоне 0,275–0,993 для $^{239+240}$Pu, а для ^{238}Pu в среднем составила 0,012 Бк/кг (рис. 1).

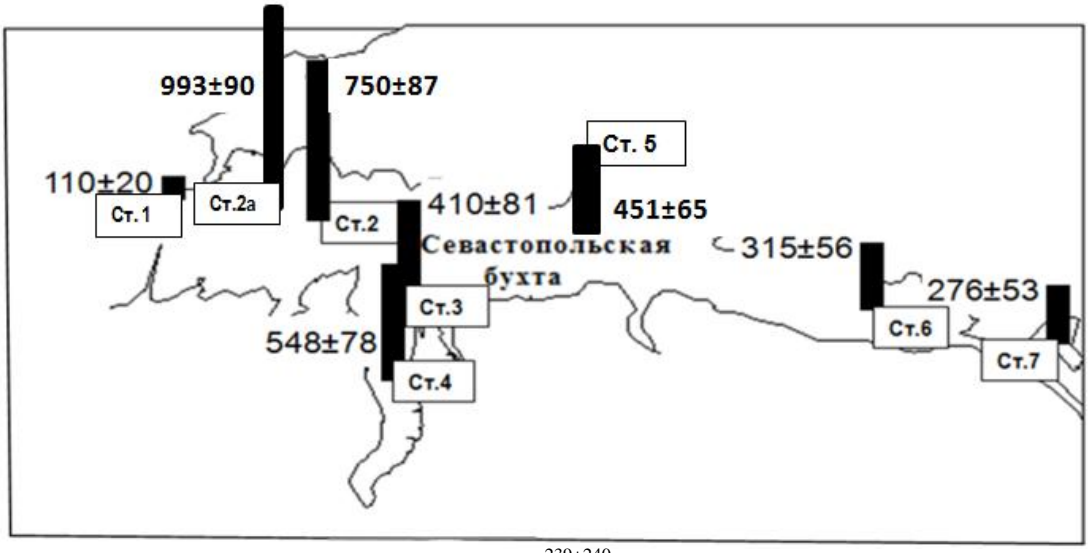

Рис. 1 Пространственное распределение плутония $^{239+240}$Pu в верхнем 0–5 см слое донных отложений Севастопольской бухты

Как видно из данных, представленных на рис. 1, концентрационная активность $^{239+240}$Pu увеличивается в верхнем 5-см слое донных осадков по мере удаления от устья реки Чёрной. Это может быть обусловлено двумя факторами. Во-первых, городские стоки, как речной сток, не могут служить источником повышенных уровней плутония, так как в водосборном бассейне бухты нет источников загрязнения окружающей среды плутонием. Поэтому сточные воды и твердый сток служат факторами разбавления плутония чернобыльского и глобального происхождения. Скорость осадконакопления, начиная от ст.7 (9,3 мм/год) уменьшается почти в 3 раза к ст. 5 (3,3 мм/год) и почти в 4 раза – к ст. 3 (2,4 мм/год) [4], что определяет возраст слоев донных отложений. Таким образом, верхний 5-см слой осадка на ст. 7 формировался в течение 5,4, на ст. 5 – 15,5 и на ст.3 – 20,8 года, соответственно. Таким образом, слои формировались в разные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС, следовательно, при разных концентрационных активностях $^{239+240}$Pu в морской воде, которые со временем уменьшались [1]. Поэтому чем «моложе» слой донных отложений, тем ниже должна быть концентрационная активность $^{239+240}$Pu в осадках, что мы и наблюдали на указанных станциях. На ст. 2-2а мы наблюдали более высокие уровни $^{239+240}$Pu, хотя скорость осадконакопления

в этой акватории была оценена в 4,6 мм/год, что менее чем в 2 раза меньше таковой на ст. 7. Очевидно, такую ситуацию можно объяснить как заходом морских вод в бухту с более высокими концентрациями $^{239+240}$Pu, так и, несомненно, изменением структуры выхода из бухты, которая носит техногенный характер и была произведена в 1970–1980-х гг. На выходе из бухты построены заградительные молы, строительство которых закончилось в 1986 г. После строительства водообмен бухты с открытой частью моря уменьшился на 40–70 % [3], и наличие молов создало своего рода седиментационную ловушку в этой акватории, что подтверждается увеличением скорости осадконакопления на ст. 2 на 90 % по сравнению со скоростью на ст. 3. Кроме того, гидротехнические работы привели к многократному взмучиванию слоя осадка и его перезахоронению, к нарушению ретроспективной картины накопления $^{239+240}$Pu в донных осадках в этом районе. Как известно, радиоактивные глобальные выпадения после испытания термоядерного оружия в открытых средах содержали практически на порядок более высокие концентрационные активности $^{239+240}$Pu (основное количество их выпадало в 60-е годы XX века), но более низкие ^{238}Pu [1], что позволяет оценивать долю глобального и чернобыльского плутония в природных образцах, подвергшихся загрязнению плутонием. К 1986 г. отношение активностей ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu для глобальных выпадений в северном полушарии в 40-вых широтах оценивалось 0,02, для чернобыльских – 0,5 [1]. Значения концентрационной активности альфа-излучающих радионуклидов плутония в вертикально профиле донных отложений представлены в табл. 1. Более высокие значения концентрационной активности $^{239+240}$Pu, чем на станциях 3–7, и низкие значения отношения ^{238}Pu/$^{239+240}$Pu указывают на преобладающую долю глобального плутония в толще донных осадков в этой акватории.

Таким образом, изучая распределение радиоактивных изотопов и зная историю их поступления, оценивая по их профилям скорость осадконакопления и скорость седиментации взвешенного вещества, можно как судить об интенсивности молисмологических процессов в разных акваториях, так и оценивать количественно последствия влияния антропогенного или природного факторов на эти процессы.

На основе данных по гидрологическим процессам в бухте [3, 4], аккумулирующей способности водорослей [1], их продукционным характеристикам [5] было выполнено сравнение вклада гидрологического (вынос с водными массами в открытое море), биотического (накопление многоклеточными многолетними водорослями, Кн (Pu) которых самый высокий) и седиментационного (депонирование в донные осадки с потоком суммарной взвеси) факторов в процесс перераспределения $^{239+240}$Pu в экосистеме бухты (табл. 2). Величина потоков выноса плутония из водной толщи бухты характеризует скорость самоочищения вод бухты от поступившего загрязнения плутонием. Как свидетельствуют полученные данные, основной вклад в элиминацию $^{239+240}$Pu из водных масс принадлежит седиментационному потоку плутония в донные отложения, который служит ведущим фактором перераспределения плутония в экосистеме, а донные отложения – местом формирования запасов плутония в бухте. При седиментации плутония в донные отложения он не выводится из системы, а только депонируется в осадки – геологическое депо в экосистеме, но при этом очищаются водные массы – фотический слой вод – основная зона функционирования первичных продуцентов в экосистеме.

Табл. 1 Вертикальное распределение альфа-радиоизотопов плутония $^{239+240}Pu$ и ^{238}Pu и отношение $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ в донных отложениях устьевой зоны Севастопольской бухты (ст. 2а, 2013 г.)

Глубина слоя донных осадков, см	Концентрационная активность альфа-излучающих радионуклидов плутония, Бк/кг ±1σ		Отношение активностей $^{238}Pu/^{239+240}Pu$ (1986 г.), доли единицы ±1σ
	$^{239+240}Pu$	^{238}Pu	
0–1	1,055 ± 0,164	0,025 ± 0,015	0,030 ± 0,019
1–2	1,102 ± 0,153	0,006 ± 0,007	0,007 ± 0,009
2–3	0,896 ± 0,202	0,031 ± 0,025	0,045 ± 0,038
3–4	0,894 ± 0,107	0,009 ± 0,007	0,012 ± 0,010
4–5	1,018 ± 0,120	0,033 ± 0,013	0,041 ± 0,017
5–6	1,034 ± 0,154	0,015 ± 0,011	0,018 ± 0,014
6–7	0,983 ± 0,145	0,014 ± 0,011	0,018 ± 0,015
7–8	1,202 ± 0,178	0,056 ± 0,013	0,059 ± 0,015
8–9	1,837 ± 0,238	0,034 ± 0,016	0,023 ± 0,012
9–10	2,231 ± 0,268	0,018 ± 0,011	0,010 ± 0,007
10–11	3,658 ± 0,398	0,021 ± 0,011	0,007 ± 0,004
11–12	2,589 ± 0,264	0,004 ± 0,005	0,002 ± 0,002
12–13	2,868 ± 0,306	0,065 ± 0,002	0,029 ± 0,009
13–14	2,917 ± 0,309	0,039 ± 0,015	0,017 ± 0,007

Табл. 2 Потоки элиминации плутония из водной толщи Севастопольской бухты

Элиминация плутония из водной толщи бухты							
Поток $^{239+240}Pu$				Удельный поток $^{239+240}Pu$			
гидрологический		седиментационный		седиментационный		биотический	
кБк/в год	%	кБк/в год	%	мБк/м^2·год	%	мБк/м^2·год	%
18,2	0,30	6014	99,70	1512	99, 89	1,6	0,11

Заключение. На основе изучения пространственного и вертикального распределения альфа-излучающих радионуклидов плутония $^{239+240}Pu$ и ^{238}Pu в донных отложениях Севастопольской бухты и с помощью радиотрассерных технологий рассчитаны скорости осадконакопления и потоки элиминации плутония из водной толщи бухты гидрологическим, седиментационным и биотическим путём как показатели самоочищения вод бухты от плутониевого загрязнения. Основной путь элиминации – седиментационное депонирования плутония в донные отложения (более 99 %). Показана возможность применения радиотрассерных исследований для изучения молисмологических процессов, происходящих в бухте, и количественной оценки влияния природных и антропогенных факторов на биогеохимические процессы.

1. Радиоэкологический отклик Чёрного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г .Г. Поликарпова и В. Н. Егорова. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ–Гидрофизика», 2008. – 667 с.
2. Терещенко Н. Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах // Наукові праці: наук.-метод. журнал. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Вип 157, том 169. Техногенна безпека. – С. 63–70.

3. Иванов В. А., Овсяный Е. И., Репетин Л. Н., Романов А. С., Игнатьева О. Г. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. – МГИ НАН Украины. – Севастополь, 2006 – 90 с.
4. Егоров В. Н., Гулин С. Б., Поповичев В. Н. и др. Биогеохимические механизмы формирования критических зон в Черном море в отношении загрязняющих веществ // Морской экологический журнал. 2013. Т. XII, № 4. С. 5–26.
5. Калугина-Гутник А. А. Фитобентос Чёрного моря. – Киев: Наук. Думка, 1975. – 245 с.

DISTRIBUTION OF PLUTONIUM ALPHA-RADIONUCLIDES IN SEVASTOPOL BAY

N. N. Tereshchenko V. N. Egorov, S. B. Gulin, V. Y. Proskurnin, A. A. Paraskhiv, I. G. Sidorov, T. A. Krylova, I. N. Moseichenko

Kovalevsky Institute of Marine Biological Research of RAS, Sevastopol, RF,
ntereshchenko@yandex.ru

The spatial and vertical distribution of plutonium alpha radionuclides $^{239+240}$Pu and ^{238}Pu in the bottom sediment of Sevastopol Bay are presented. The evaluation of the plutonium biogeochemical migration parameters and the contribution of different ways of $^{239+240}$Pu elimination to self-purification of bay waters against plutonium contamination were carried out.

Key words: Black Sea, Sevastopol Bay, $^{239+240}$Pu, vertical and spatial distribution, sedimentation flows, ways of $^{239+240}$Pu elimination from the water masses of the bay