

Н.Н.Терещенко, В.Ю.Проскурнин, С.Б.Гулин, Т.А.Крылова

Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ПЛУТОНИЯ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ

Представлены результаты исследований по программе радиохемозкологического мониторинга содержания ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в донных отложениях сева­стопольских бухт. Рассчитаны коэффициенты накопления плутония и фактор радиоёмкости, запасы плутония в верхнем слое донных осадков. Оценены среднегодовые потоки поступления плутония в донные отложения в каждой бухте. В результате мониторинговых исследований получены количественные радиэкологические параметры, характеризующие миграцию и депонирование плутония в донные отложения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Чёрное море, сева­стопольские бухты, ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$, донные отложения.*

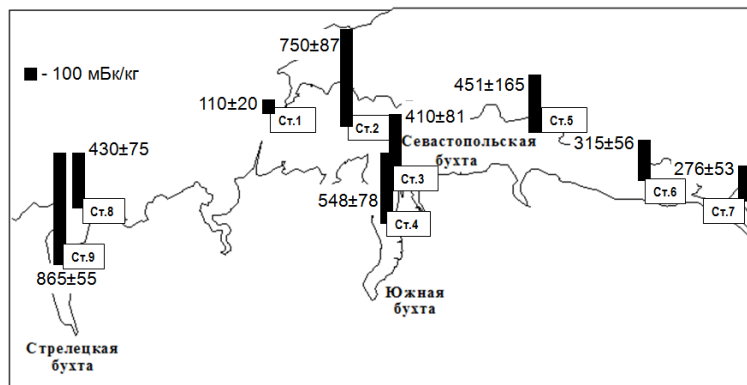
Введение. Альфа-излучающие радионуклиды плутония ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$, поступили в Чёрное море вследствие глобальных выпадений и после аварии на Чернобыльской АЭС [1]. В настоящее время в черноморских экосистемах концентрации Pu имеют низкие значения, которые не оказывают негативного влияния на гидробионты [1, 2], но исследование миграции и перераспределения Pu в морских экосистемах имеет большое значение. Такие исследования позволяют изучить закономерности биогеохимического поведения Pu , определить количественно его радиэкологические характеристики.

Целью нашего исследования было изучение уровней загрязнения донных отложений ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в сева­стопольских бухтах в постчернобыльский период, определение радиэкологических параметров: коэффициентов накопления, фактора радиоёмкости донных осадков в отношении Pu и среднегодовых потоков поступления в них плутония, а также запасов плутония в поверхностном слое донных отложений.

Материалы и методы. Определение концентраций $^{238}, ^{239+240}\text{Pu}$ были выполнены в 2003 – 2011 гг. в донных отложениях из Севастопольской (ст.1 – 7), Стрелецкой (ст.8 – 9), Балаклавской (ст.11 – 14) бухт (рис.1, 2), а также у выхода из Казачьей бухты. Для анализа отбирали поверхностный слой донных отложений 0 – 5 см, а в Севастопольской бухте на ст.3 – колонки донных осадков с шагом нарезки верхнего слоя 0,5 см и последующих слоев 1 см.

Радионуклиды плутония из природных образцов выделяли с помощью радиохимического метода с использованием колоночной ионообменной хроматографии, с последующим изготовлением тонкослойных препаратов [1]. Образцы измеряли на альфа-спектрометре «EG&G ORTEC OСТЕТЕ РС». Химический выход элемента в методике оценивали с помощью вносимого радиоактивного трассера ^{242}Pu и он варьировал от 50 до 80 %.

Концентрации радионуклидов представлены в Бк·кг⁻¹ сухой массы донных отложений.



Р и с . 1 . Распределение концентраций $^{239+240}\text{Pu}$ (Бк·кг⁻¹) в 0 – 5 см поверхностном слое донных отложений в Севастопольской и Стрелецкой бухтах.

Результаты и обсуждение. Результаты определения концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ в постчернобыльский период в донных отложениях Севастопольской и Стрелецкой бухт представлены на рис.1.

В Севастопольской бухте (ст.2 – 7) в 2007 – 2011 гг. в иловых донных отложениях концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ изменялась от 276 до 750 мБк·кг⁻¹, а в песчаных – на внешнем рейде бухты на ст.1 (2003, 2005 и 2007 гг.) варьировала от 86 до 127 мБк $^{239+240}\text{Pu}$ ·кг⁻¹. Средняя концентрация ^{238}Pu на ст.1 за период наблюдений составляла 12 мБк·кг⁻¹. В иловых донных осадках на ст.3 в 2007 г. она равнялась 78 ± 35 мБк ^{238}Pu ·кг⁻¹. На ст.2 – 7 в 2011г. концентрация ^{238}Pu была ниже предела детектирования. Наибольшие значения концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ на ст.2 и 4, вероятно, обусловлены высокими скоростями осадконакопления в этих районах (рис.1) [1, 3].

Результаты изучения вертикального распределения $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в донных отложениях на ст.3 приведены в табл.1. Содержание $^{239+240}\text{Pu}$ во всех слоях в среднем на порядок превышало концентрацию ^{238}Pu . Концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ изменялись от слоя к слою неравномерно. Поскольку известно, что отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в глобальных выпадениях составляло в среднем около 0,03, а в чернобыльских выпадениях – 0,5 [1 – 3], то по величине отношения судили о наличии в исследованных пробах определенной доли плутония чернобыльского происхождения. Очевидно, максимальное поступление чернобыльского плутония соответствует максимальному значению отношения (табл.1) и приурочено к слою № 9 донных отложений (7 – 8 см), что по хронологии соответствует концу 80-х гг. [1]. Доля чернобыльского загрязнения в суммарном количестве плутония в донных отложениях уменьшалась с течением времени. Это нашло отражение в снижении отношения $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ в слоях № 8 – 3 (табл.1).

Пройдя через минимум, отношение увеличилось до 0,11 в слое № 2 (0,5 – 1 см), что может свидетельствовать о временном увеличении поступления плутония чернобыльского происхождения, так называемом вторичном загрязнении черноморских вод при усилении миграции Pu из загрязнённых радионуклидами территорий. Подобные тенденции были отмечены для дру-

Таблица 1. Вертикальное распределение $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{238}Pu в донных отложениях на ст.3 в Севастопольской бухте и отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$.

№ слоя донных отложений	глубина залегания слоя донных отложений от поверхности дна, см	концентрация радионуклидов плутония, мБк·кг ⁻¹		отношение $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$
		$^{239+240}\text{Pu}$	^{238}Pu	
1	0 – 0,5	366	29	0,08
2	0,5 – 1	628	70	0,11
3	1 – 2	440	28	0,04
4	2 – 3	494	21	0,03
5	3 – 4	419	39	0,09
6	4 – 5	211	28	0,13
7	5 – 6	357	55	0,15
8	6 – 7	309	66	0,21
9	7 – 8	306	95	0,31

гих чернобыльских радионуклидов, таких как ^{90}Sr и ^{137}Cs [1, 4]. Таким образом, изменение отношения $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$ позволяет отслеживать историю поступления чернобыльских радионуклидов в Чёрное море.

В 2003 г. на ст.8 в Стрелецкой бухте (рис.1) в иловых донных отложениях концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ составляла 430 мБк·кг⁻¹ и ^{238}Pu 45 мБк·кг⁻¹, а в 2011 г. на ст.9 865 мБк·кг⁻¹ $^{239+240}\text{Pu}$ и 30 мБк·кг⁻¹ ^{238}Pu .

В Казачьей бухте у выхода из бухты в песчаных донных отложениях концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ была 86, а ^{238}Pu 6 мБк·кг⁻¹.

Результаты измерения концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ в Балаклавской бухте (2010 г.) представлены на рис.2. Концентрация $^{239+240}\text{Pu}$ увеличивалась от вершины бухты к выходу из нее, а максимальные значения отмечены на ст.14 (рис.2). В целом, уровни концентраций $^{239+240}\text{Pu}$ в иловых отложениях Балаклавской бухты были ниже в 2 – 3 раза, чем в Севастопольской и Стрелецкой бухтах (рис.1, 2), что может быть связано с историей поступления загрязнения в Балаклавскую бухту. Этому может способствовать и преиму-

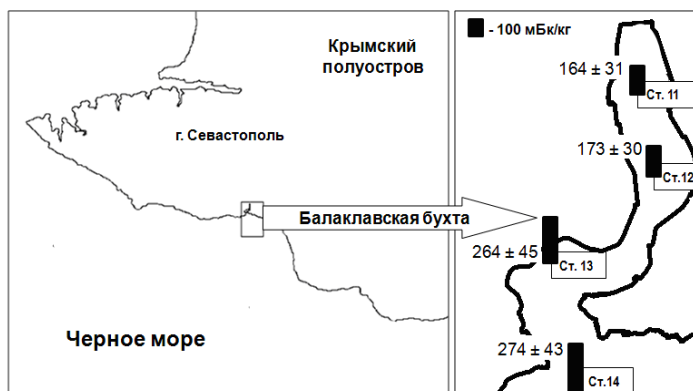


Рис. 2. Концентрации $^{239+240}\text{Pu}$ (мБк·кг⁻¹) в поверхностном 0 – 5 см слое донных отложений в Балаклавской бухте.

ществленное наличие в составе вод поверхностного стока частиц горных пород [5], возможным изъятием донных осадков во время дноуглубительных работ [5], более низкой, по сравнению с Севастопольской бухтой, интенсивностью поступления радиоактивного загрязнения из водосборного бассейна бухты, так как поверхностный и речной сток на порядки величин ниже для Балаклавской бухты [5, 6].

Рассчитанные нами коэффициенты накопления (K_n) плутония иловыми и песчаными донными отложениями значительно различались между собой. Для иловых осадков K_n плутония изменялись в диапазоне $1,1 \cdot 10^5 - 4,3 \cdot 10^5$, а для песчаных донных отложений они были на порядок ниже и варьировали в пределах $4,2 \cdot 10^4 - 6,4 \cdot 10^4$.

Интегральной характеристикой роли донных отложений в перераспределении радионуклидов в водоёмах служит их радиоёмкость. В качестве количественного показателя этой способности используют фактор радиоёмкости (F) [7, 8].

Нами был рассчитан F (Pu) донных отложений изученных севастопольских бухт. Он составлял для иловых донных отложений больше 99 %, для песков - около 91 %. Следовательно, практически, весь плутоний в экосистемах севастопольских бухт аккумулируется донными отложениями.

С использованием данных по скорости осадконакопления, опубликованных в работах [1, 3], нами были рассчитаны среднегодовые потоки плутония в донные отложения. В среднем для Севастопольской бухты годовой поток $^{239+240}Pu$ составлял 1204, для Стрелецкой 910, для Балаклавской $217 \text{ мБк} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$.

На основе наших данных по аккумуляции плутония в донных отложениях и морфометрических характеристик бухт, которые были взяты из работ [6, 9], оценены запасы альфа-радионуклидов плутония в севастопольских бухтах в постчернобыльский период. Запас $^{239+240}Pu$ в поверхностном слое донных отложений равен в Севастопольской бухте 216523, в Стрелецкой 2275 и в Балаклавской 4860 кБк.

Таким образом, в настоящее время в донных отложениях Севастопольской, Стрелецкой и Балаклавской бухт аккумулированы свыше 220000 кБк $^{239+240}Pu$.

Заключение. Таким образом, определены радиоэкологические параметры, количественно характеризующие миграцию и депонирование плутония в донные отложения севастопольских бухт, на основе которых можно оценивать и прогнозировать поведение Pu , а также уровни загрязнения им черноморских экосистем при различных начальных условиях, включая аварийные ситуации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полицарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыцугина 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 / Под ред. Г.Г.Полицарпова и В.Н.Егорова.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008.– 667 с.
2. Терещенко Н.Н., Полицарпов Г.Г. Радиационно-экологическая ситуация в

- Чёрном море в отношении $^{238,239,240}\text{Pu}$ после Чернобыльской аварии по сравнению с некоторыми другими водоёмами в 30-км зоне Чернобыльской АЭС и за ее пределами. Проблемы радиэкологии и пограничных дисциплин / Под ред. В.И. Мигунова и А.В. Трапезникова.– Нижневартовск: ООО "Алстер", 2007.– вып.10.– С.12-29.
3. Гулин С.Б., Сидоров И.Г., Гулина Л.В. Биогенная седиментация в Чёрном море: радиотрассерное исследование // Морской экологический журнал.– 2013.– т.ХІІ, № 2.– С.19-25.
 4. Gulin S.B., Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G., Sidorov I.G., Proskurnin V.Yu. Secondary radioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends // JER.– 2013.– № 124.– С.50-56.
 5. Ломакин П.Д., Попов М.А. Океанологическая характеристика и оценка загрязнения вод Балаклавской бухты.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011.– 184 с.
 6. Стокозов Н.А. Морфометрические характеристики Севастопольской и Балаклавской бухт.– 2010.– С.198-208.– http://www.ocean.nodc.org.ua/MHI_Scientists/publications/doc_view/34-morphometric-properties-of-the-sevastopol-and-the-balaklava-bays.html?tmpl=component.
 7. Поликарпов Г.Г. Радиэкология морских организмов / Под ред. В.П.Шведова.– М.: Атомиздат, 1964.– 295 с.
 8. Терещенко Н.Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах. Наукові праці: науково-методичний журнал. Серія: Техногенна безпека.– Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011.– т.169, вип.157.– С.63-70.
 9. Тихонова Е.А. Потоки нефтяных углеводородов через бентосные сообщества *Abra ovata* – *Nassarius reticulatus* // Экология моря.– 2009.– вып.77.– С.91-93.

Материал поступил в редакцию 09.06.2013 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати досліджень за програмою радіохемоекологічного моніторингу вмісту ^{238}Pu і $^{239+240}\text{Pu}$ в донних відкладах севастопольських бухт. Розраховано коефіцієнти накопичення плутонію, фактор радіємності, запаси плутонію у верхньому шарі осадів у вивчених бухтах. Оцінено середньорічні потоки надходження плутонію в донні відкладення в кожній бухті. В результаті моніторингових досліджень отримані кількісні радіоекологічні параметри, що характеризують міграцію і депонування плутонію в донні відклади.

ABSTRACT The results of research under the program of radio-chemo-ecological monitoring of the ^{238}Pu and $^{239+240}\text{Pu}$ content in the bottom sediment of Sevastopol bays are presented. The plutonium concentration factor, radiocapacity factor and plutonium budget in the upper layer of bottom sediments were determined. The plutonium rate flow to the bottom sediments for each bay was estimated. As a result of the monitoring studies the quantitative radio-ecological parameters describing the plutonium migration and deposition to the bottom sediments were determined.