

ВЕДУЩАЯ РОЛЬ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ В ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИИ ПЛУТОНИЯ В ЧЕРНОМОРСКИХ ЭКОСИСТЕМАХ

Для характеристики роли донных отложений в перераспределении плутония в экосистеме Черного моря были выполнены определения концентраций плутония в донных отложениях из открытых и прибрежных районов, воде и гидробионтах. Оценена концентрирующая функция донных отложений в зависимости от их состава, среднегодовой поток плутония в донные отложения и фактор радиоемкости черноморских донных осадков в отношении плутония. Рассчитаны среднегодовые дозы, создаваемые плутонием в абиогенных и биогенных компонентах экосистемы. Обозначены потенциально критические зоны в черноморских экосистемах в отношении плутония.

Ключевые слова: альфа-радионуклиды плутония, Черное море, донные отложения, коэффициенты накопления, фактор радиоемкости, дозы, потенциально критические зоны.

Для характеристики ролі донних відкладень у перерозподілі плутонію в екосистемі Чорного моря були виконані визначення концентрацій плутонію в донних осадах із відкритих і прибережних районів, воді і гідробіонтах. Оцінена концентруюча функція донних відкладень залежно від їх складу, середньорічний потік плутонію в донні відкладення і чинник радіємності чорноморських донних осадів відносно плутонію. Розраховані середньорічні дози, створювані плутонієм в абіогенних та біогенних компонентах екосистеми. Визначені потенційно критичні зони в чорноморських екосистемах відносно плутонію.

Ключові слова: альфа-радіонукліди плутонію, Чорне море, донні відкладення, коефіцієнти накопичення, чинник радіємності, дози, потенційно критичні зони.

Determinations of plutonium concentrations were fulfilled in the bottom sediments from the open and off-shore areas, in seawater and hydrobionts for description of the bottom sediment role in the plutonium redistribution in the Black Sea ecosystems. It was estimated the concentrating function of the bottom sediments depending on their composition, average annual plutonium stream to the bottom sediments and factor of radiocapacity of the Black Sea bottom sediments concerning plutonium. Average annual plutonium doses in abiogenic and biogenic components of ecosystem are calculated. Potentially critical zones were defined in Black Sea ecosystems with regard to plutonium.

Key words: alpha-radionuclides of plutonium, Black sea, bottom sediment, concentration factor, factor of radiocapacity, doses, potentially critical zone.

Введение

В результате нормативной работы ядерных предприятий и аварийных инцидентов, связанных с ядерными технологиями, в природные экосистемы поступает плутоний, альфа-радиоизотопы которого характеризуются преимущественно длительным периодом полураспада (для ^{239}Pu это 24000 лет), что формирует долговременный техногенный экологический фактор с радиационно-токсическим действием на биоту и обуславливает необходимость детального изучения радиоэкологии плутония [1-4]. Вызывают интерес, прежде всего, процессы миграции плутония и перераспределения в экосистемах, опре-

деление мест его преимущественной аккумуляции и количественных параметров, характеризующих его биогеохимическую миграцию, расчет дозовых нагрузок в разных компонентах экосистемы. Эти данные необходимы для оценки современной радиоэкологической ситуации и тенденций ее развития, а также составления научно обоснованных прогнозов и планирования необходимых контрмер в случае радиационных инцидентов.

Целью нашей работы было изучение распределения и миграции радиоизотопов плутония (^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$) в компонентах экосистем в Черном море в постчернобыльский период и характеристика роли

донных отложений в этих процессах на основе изученных количественных радиоэкологических параметров.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи: изучение уровней загрязнения радиоизотопами плутония донных отложений разных по составу (илистых и песчаных) в прибрежных акваториях, а также в открытых районах; определение количественных характеристик: коэффициентов накопления, фактора радиоемкости донных отложений и среднегодового потока плутония в донные осадки; количественная оценка поглощенных и эквивалентных доз создаваемых альфа-радионуклидами Pu в биогенных и абиогенных компонентах экосистем; выявление факторов формирования критических зон и определение потенциально-критических зон в черноморских экосистемах в отношении загрязнения плутонием.

Материалы и методы исследования

Проведены определения концентраций $^{238,239,240}\text{Pu}$ в 1998-2010 гг. в воде, донных отложениях, из открытых районов и прибрежных акваторий Черного моря, в гидробионтах: бурых многоклеточных водорослях: *Cystoseira crinita* (Desf.) Borg, зеленых многоклеточных водорослях: *Ulva rigida* Ag., двустворчатых моллюсках: *Mytilus galloprovincialis* Lam. и рыбах: *Trachurus mediterraneanus ponticus* Aleev, *Merlangus merlangus euxinus*, *Sprattus sprattus phalericus* (Risso).

Радионуклиды плутония из природных образцов выделяли с помощью радиохимического метода с использованием колонной ионообменной хроматографии [3, 5]. Из выделенных радиоизотопов изготавливали тонкослойные альфа-препараты путем соосаждения плутония с фторидом лантана на мембранные фильтры [6]. Количественное определение радионуклидов плутония осуществляли по активности проб на основании спектров альфа-излучения препаратов по максимальным энергиям альфа-частиц. Измерение проб производили на альфа-спектрометре EG&G ORTEC OSTE PC. Химический выход элемента в методике выделения оценивали с помощью радионуклида ^{242}Pu , и он варьировал от 60 до 80 %. Для калибровки и определения эффективности счета использовали стандартные источники: № 5 и № 49, содержащие радионуклиды ^{242}Pu и ^{243}Am (с активностью 1.6579 Бк и 2.5617 Бк и 2.0092 Бк и 2.5198 Бк, соответственно), прошедшие интеркалибровку в лаборатории РИСОЕ (Дания), а также № 6651 – ^{239}Pu (3,79 Бк) и № 6652 – ^{239}Pu (6,2 Бк), которые проходили проверку в метрологическом центре в Харькове (Украина). Относительная ошибка определения не превышала 20 %.

Расчет доз производили, согласно общепринятым подходам [7, 8, 9].

Результаты и обсуждение

После аварии на Чернобыльской АЭС, радионуклиды плутония в начальный период поступали в Черное море воздушным путем и концентрации плутония практически не отличались резко в разных районах моря. Но в дальнейшем их поступление

происходило за счет переноса с водными массами рек в основном со взвесью, поэтому в устьевых зонах Днепра, Буга а также Дуная и в районе сброса вод из оросительной системы Северо-Крымского канала (СКК) наблюдали поля повышенных концентраций плутония. В таблице 1 представлены собственные и литературные данные о концентрациях основных радиоэкологически значимых трансурановых элементов (ТУЭ) в воде Черного моря в разные периоды после аварии на ЧАЭС [3, 11, 12]. К моменту аварии на ЧАЭС в Черном море присутствовали радионуклиды плутония глобальных выпадений. Идентификацию происхождения техногенных радионуклидов производят по характерным изотопным соотношениям присущим каждому источнику радиоактивного загрязнения [3, 10, 11]. Так соотношение ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ было равно порядка 0,5 в чернобыльских выпадениях (в отличие от такового равного 0.04 в глобальных выпадениях), поэтому соотношение этих изотопов и служило маркером поступления и миграции аварийных чернобыльских радионуклидов, а также позволяло оценивать их долю в общем загрязнении моря плутонием. Из данных, приведенных в таблице 1 по соотношению ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$ можно судить, о доле чернобыльских радионуклидов в общем их содержании в морской поверхностной воде и ее изменении во времени. Если в 1986-1987 гг. чернобыльский плутоний составлял основную массу в общем содержании плутония в поверхностных водах в Днепровском эстуарии и прилегающей части северо-западного района Черного моря, то в центральной и южной частях моря он составлял не более половины от общего количества плутония в поверхностных водах [3, 11]. Со временем уменьшение поступления плутония с водами Днепра привело к снижению этого отношения и в северо-западной части моря.

В начальный период после аварии концентрации кюрия (^{242}Cm) были выше таковых плутония [11], но в течение 2,3 года они резко снизились (на 2 порядка) и продолжали снижаться с такой же скоростью за счет короткого периода полураспада этого радиоизотопа (162 суток), поэтому на современном этапе ^{242}Cm не влияет на радиоэкологическую ситуацию в регионе. Плутоний же и сегодня относится к основным дозообразующим техногенным радионуклидам, так как его альфа-радиоизотопам свойственны длительные периоды полураспада. В нынешней ситуации определение отношения этих радионуклидов затруднено из-за низких концентраций ^{238}Pu в черноморских водах (табл. 1).

Первоначально поступив в водные массы, радионуклиды плутония в дальнейшем мигрировали в другие компоненты черноморских экосистем. Как уже отмечалось выше, в силу географического положения источника чернобыльских радиоактивных изотопов плутония их дальнейшее поступление происходило преимущественно за счет переноса с водными массами рек в основном со взвесью, поэтому особенно в зонах поступления днепровских вод наблюдали поля повышенных концентраций

плутония (табл. 1). Это сказалось на уровнях накопления плутония в донных осадках. И на современном этапе в этих районах сохраняются повышенные концентрации плутония в донных отложениях: 920 и 680 мБк·кг⁻¹, соответственно Днепровский эстуарий и выход СКК в верховье Каркинитского залива (рис. 1). При близкой локализации станций концентрация нуклидов плутония в иловых донных отложениях выше, чем в осадках песчанистых во много раз. Это указывает на высокую аккумуляционную способность черноморских иловых донных отложений в отношении плутония, количественным показателем которой служит коэффи-

циент накопления. Значения коэффициентов накопления плутония черноморскими осадками были высокими и для иловых донных отложений составили $n \cdot 10^4 - 2 \cdot 10^5$, а для песчанистых – $n \cdot 10^3 - 2 \cdot 10^4$ единиц, тогда как, например, для ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr (основных дозообразующих радионуклидов) они составляли величины порядка $n \cdot 10^2$ и $n \cdot 10^0$, соответственно [3; 13]. Очевидно, что ведущую роль в депонировании плутония в черноморских донных отложениях играют илы, коэффициенты накопления которых в отношении плутония на порядок и больше превышают таковые для песчанистых донных отложений.

Таблица 1

Концентрации ТУЭ в поверхностной воде Черного моря в разные периоды после аварии на Чернобыльской АЭС [3, 11, 12]

Район, дата отбора проб в Черном море	Концентрации ТУЭ, мкБк·л ⁻¹				²³⁸ Pu ^{239, 240} Pu
	²³⁸ Pu	^{239,240} Pu	²⁴¹ Am	²⁴² Cm	
Центральная и южная часть, 1986 г.	1,3-1,4	6,7-16,9	1,0-2, 0	34,0-43,0	0,2-0,3
Северо-западная часть, 1986-1987 гг.	122	300			0,4
Днепровский эстуарий, 1986-1987гг.	550-800	1000-2000			0,4-0,5
Открытая часть, 1988 г.	2,4-7,9	6,6-22			0,2-0,3
Северо-западная часть, 1998 г.	0,6*	3,0-5,0	1,7*		0,1-0,2
Центральные и прибрежные районы, 1998-2002 гг.	0,6*-7,0	2,0-20,0			0,1-0,3
У юго-восточного побережья Крыма, 2010 г.	ниже предела детектирования	1, 9-2,1			

*Относительная ошибка определения составляла больше 20 %.

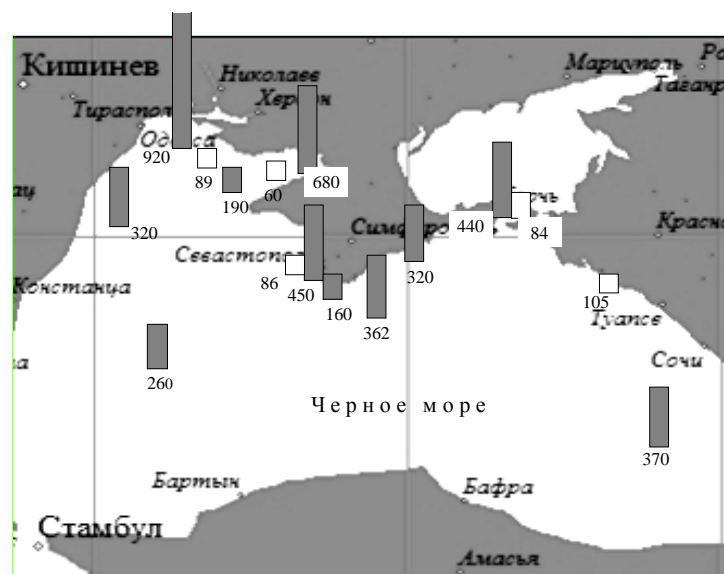


Рис. 1. Плутоний (^{239,240}Pu мБк·кг⁻¹ сухой массы) в Черном море в донных осадках в слое 0 – 10 см: илы – ■; песчанистые донные отложения – □

Интегральной характеристикой для оценки роли донных отложений в перераспределении радионуклида в водоеме служит радиоемкость как мера способности донных отложений аккумулировать и удерживать радиоактивные вещества, изначально поступившие в водную среду [15-17]. В качестве количественного показателя радиоемкости используют фактор радиоемкости, предложенный Агре и Корогодиным. Он указывает на долю радионуклида, которую аккумулируют донные осадки из водной толщи, и зависит от аккумулирующей способности

донных отложений, а также глубины водоема и толщины аккумулирующего слоя осадков [7]:

$$F = K_n \cdot h / (H + K_n \cdot h),$$

где F – фактор радиоемкости, K_n – коэффициент накопления, h – накапливающий слой донных отложений, H – глубина водоема, см.

Величины фактора радиоемкости для черноморских донных отложений в отношении плутония, рассчитанные на основе натуральных данных и выраженные в процентах, представлены в таблице 2.

Таблиця 2

Фактор радиоемкости донных отложений (F) в отношении $^{239+240}\text{Pu}$ [14], ^{137}Cs и ^{90}Sr [13] в Черном море на разных глубинах

Глубина, м	Площадь дна,		F·100 %		
	км ²	%	$^{239+240}\text{Pu}$	^{137}Cs	^{90}Sr
0-100	101452	24,1	$9,8 \cdot 10^2$	10	10^{-3}
100-200	11400	2,7	$9,6 \cdot 10^2$	3	10^{-4}
200-500	14610	3,5	$6,9 \cdot 10^2$	0,3	10^{-5}
500-1000	21220	5,0	$5,2 \cdot 10^2$	10^{-1}	10^{-5}
1000-1500	33480	8,0	$3,9 \cdot 10^2$	10^{-1}	10^{-5}
1500-2000	86571	20,6	$3,1 \cdot 10^2$	10^{-2}	10^{-5}
2000-2100	40765	9,7	$2,8 \cdot 10^2$	10^{-2}	10^{-5}
2100-2200	94551	22,5	$2,7 \cdot 10^2$	10^{-2}	10^{-5}
2200	16270	3,9	$2,7 \cdot 10^2$	10^{-2}	10^{-6}

Высокие значения F(Pu) характеризуют особенности поведения этого радионуклида в черноморских экосистемах. Если сравнивать фактор радиоемкости для плутония с таковым для цезия и стронция, то очевидны отличия биогеохимического поведения плутония. Как известно, стронций относится к гидротропным радионуклидам. Он остается в воде и перемещается вместе с водными массами (в том числе за пределы Черного моря), а донными отложениями практически не накапливается или накапливается очень мало [13], поэтому фактор радиоемкости стронция оставляет тысячные доли процента. Хотя цезий относится к педотропным радионуклидам, но его аккумуляция в донных отложениях существенно влияет на перераспределение в системе вода-донные отложения только на шельфе. Донные осадки материкового склона и котловины Черного моря аккумулируют в значительно меньшей степени цезий, основное количество которого остается в водной массе и может мигрировать за пределы водоема [13]. Плутоний же обладает самым высоким фактором радиоемкости как на шельфе, так и в районах материкового склона и котловины Черного моря. Особенно существенны эти величины для илов. На глубинах 100-200 м илы способны аккумулировать до 98 % радионуклида, а на больших глубинах – около 30 %. Это определяет относительно быстрое обеднение черноморских водных масс плутонием и уменьшение его выноса за пределы экосистемы с водными массами. Быстрое и прочное связывание плутония с донными осадками в Черном море указывает на барьерную роль Черного моря в отношении его поступления в моря средиземноморского бассейна.

Предельной радиоемкостью донных отложений в отношении конкретного радионуклида считают величину активности этого радионуклида, при которой достигается динамическое равновесие процессов выведения и поступления радионуклида в донные отложения водоема [15; 16]. Возрастание концентрации плутония в донных отложениях при увеличении концентрации плутония в воде, как это наблюдалось в районах его усиленного поступления по сравнению с удаленными районами, свидетельствует о том, что в донных отложениях Черного моря не достигнут предел насыщения в отношении

плутония. Таким образом, содержание плутония в донных отложениях не достигло предела аккумуляционной способности осадков [15] в отношении этого радионуклида и экосистема сохраняет определенный запас радиоемкости для кондиционирования водных масс. В случае дополнительного поступления радиоактивного загрязнения в морские воды экосистема будет способна к самоочищению вод за счет естественных внутренних процессов.

Скорость седиментации плутония в донные осадки и освобождение водных масс от основного количества плутония определяет высокую способность к самоочищению черноморских вод от радионуклидов плутония, интегральной количественной характеристикой которой служит также период полужизни радионуклида в поверхностных водах. Он оценен в отношении $^{239,240}\text{Pu}$ для поверхностных черноморских вод в 5-8 лет [18], что почти в два раза меньше, чем таковой для Средиземного моря (13±2 года) [19]. Этому способствуют целый ряд процессов и характеристик как Черного моря, так и самого плутония [12, с. 20-23]. Прежде всего, это особенности физико-химических свойств плутония: способность пребывать в растворах в нескольких степенях окисления и изменять степень окисления в зависимости от окислительно-восстановительного потенциала среды, увеличивать сродство к частицам и прочности связывания с ними с уменьшением степени окисления, способность к комплексообразованию, сорбции и соосаждению в определенных условиях. Важную роль также играют процессы разной природы в самом водоеме: в устьевых зонах – наличие биогеохимических барьеров (изменение солёности, pH, изменение форм многих химических элементов, повышенные концентрации биогенов), изменение с глубиной в Черном море окислительно-восстановительных условий, благодаря наличию сероводородной зоны, а также трофный статус моря. Таким образом, в водах Черного моря изменение окислительной среды на восстановительную на глубинах свыше 200 м обуславливает изменение степени окисления плутония и более прочное его связывание с частицами (при степени окисления V, VI – плутоний находится преимущественно в растворенной форме в окислительных условиях, а в восстановительных условиях преобладают степени

окисления III, IV – плутоний находится преимущественно во взвешенной форме). В устьевых районах на границе река-море в окислительной зоне идет процесс соосаждения плутония с железом и марганцем, которые здесь переходят во взвешенную форму. Такой же процесс происходит в редокс зоне моря. Увеличение биологической продуктивности черноморских вод из-за поступления с речными водами биогенных элементов, обогащение поверхностных вод биогенами из глубинных слоев моря и, как следствие, мезотрофный статус Черного моря – все это приводит к увеличению потока биогенной седиментации и дополнительному выносу плутония из толщи вод. В результате таких биогеохимических и гидрофизических процессов на разных глубинах моря и в различных его районах сформировался

комплекс условий, при которых плутоний прочно связывается со взвешенными частицами и ускоренно седиментирует в донные отложения, тем самым происходит уменьшение времени пребывания элемента в толще вод и депонирование плутония в донные отложения. Эта радиоэкологическая особенность поведения плутония в Черном море в отличие от менее интенсивно протекающего процесса самоочищения водных масс в отношении этого нуклида в Средиземном море (которое имеет окислительную толщу и олигосапробный статус) определяет специфику закономерности перераспределения плутония в абиогенных компонентах экосистемы Черного моря, которую отражают количественные оценки запасов радионуклида в абиогенных компонентах морских экосистем, выраженные в процентах (рис. 2).



Рис. 2. Распределение запасов ^{239, 240}Pu в водной толще и донных отложениях в Черном и Средиземном морях.

В итоге, если в Средиземном море 95 % плутония содержится в водной толще, то в воде Черного моря содержится только около 10 % от его общего содержания в экосистеме [3].

Скорость седиментации и концентрации плутония в среде определяют интенсивность поступления плутония в донные отложения в разных участках Черного моря. Количественно интенсивность поступления нуклида можно выразить через среднегодовые

потоки плутония в осадки, рассчитанные на основе значений скорости осадконакопления для этих районов [3, 24] (табл. 3). Как видно из приведенных результатов максимальные среднегодовые потоки плутония в донные осадки наблюдали в районах непосредственного поступления загрязненных речных вод из Дуная и Днепра и в заиленных участках бухт.

Таблица 3

Среднегодовые потоки плутония в осадки Черного моря

Район отбора проб	Глубина, м	Скорость осадконакопления, мм/год [3, 24]	Скорость седиментации взвешенного вещества, г/м ² ·год [3]	Среднегодовой поток плутония, мБк/м ² ·год
Взморье Дуная	26	11,5	3994	1278
Днепровско-Бугский лиман	13	9,2	3670	3376
Глубоководная зона	1983	0,4	70	18
Севастопольская бухта	15	2,4	607	190
Стрелецкая бухта	14	4,1	888	400

Таким образом, донные отложения Черного моря служат депо радионуклидов плутония, играют в процессах перераспределения плутония в экосистеме ведущую роль и именно на основании полученных результатов по содержанию плутония (рис. 1) и оценок фактора радиоемкости (табл. 2), значений среднегодовых потоков плутония в осадки (табл. 3) можно выделить критические зоны в экосистеме Черного моря, где процесс депонирования происходил

особенно интенсивно: это шельфовые районы, прежде всего, барьерные зоны в устьевых зонах рек и оросительных пресноводных каналов (для черноморских радионуклидов это устье Днепра и Буга, Дуная, СКК), заиленные участки бухт. В современной радиоэкологической ситуации в этих районах концентрации плутония составляют относительно невысокие значения. Но эти зоны можно отнести к потенциально-критическим зонам в отношении

плутония, так как в них формируются повышенные уровни содержания плутония по сравнению с другими районами. В случае возможных радиационных инцидентов именно такого рода районы будут являться критическими звеньями радиационного воздействия плутония.

Биогенные компоненты черноморских экосистем накапливают плутоний достаточно интенсивно и для

отдельных групп черноморской биоты характерны высокие значения коэффициентов накопления плутония [25; 26]. Их величины отличаются для представителей различных таксономических групп и убывают в ряду: макроводоросли > двустворчатые моллюски > рыбы. Сравнение коэффициентов накопления плутония для биотических и абиотических компонентов представлено на рисунке 3 [27].

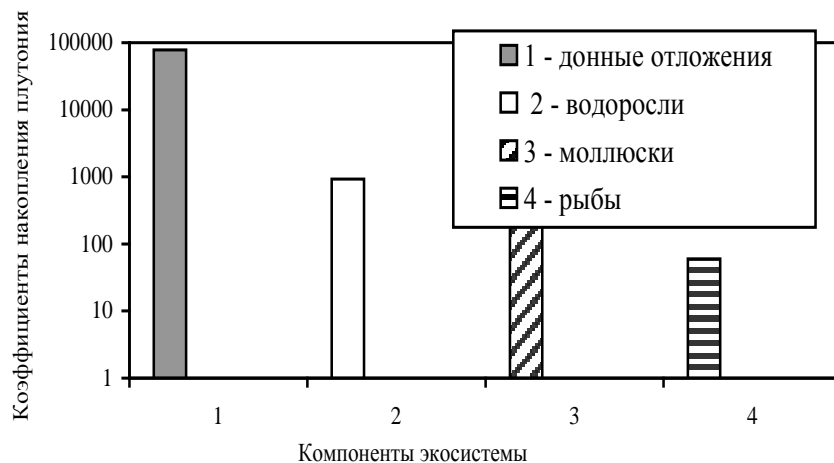


Рис. 3. Коэффициенты накопления ^{239,240}Pu абиотической и биотическими компонентами черноморских экосистем

Коэффициенты накопления донными отложениями на 2-3 порядка превышают коэффициенты накопления плутония гидробионтами, к тому же биомасса морских организмов составляет малозначимую часть (около 1 миллионной доли) в экосистеме, поэтому в отличие от пресноводных высокопродуктивных экосистем, где биомасса составляет значительную часть экосистемы [16] в Черном море гидробионты не играют существенную роль в депонировании плутония, но увеличивают поток плутония по пищевым цепям к человеку, потребля-

ющему море продукты, так как концентрации плутония в гидробионтах на 2-3 порядка выше, чем в водной среде. Следовательно, донным отложениям принадлежит ведущая роль в перераспределении и депонировании плутония в экосистеме Черного моря. Поэтому именно в донных отложениях и дозовые нагрузки, создаваемые плутонием в компонентах черноморских экосистем, достигают самых высоких значений и обитатели именно этого биотопа подвержены усиленному радиационному риску (табл. 4).

Таблица 4

Дозовые нагрузки от ^{239,240}Pu в компонентах экосистемы Черного моря

Компонент экосистемы	Мощность поглощенной дозы, мкГр/год	Мощность эквивалентной дозы, мкЗв/год
Донные осадки (илы)	14,720	
Вода	0,00008	
Макроводоросли	0,354	7,08
Моллюски	0,062	1,24
Рыбы	0,047	0,94

Дозы, сформированные на современном этапе плутонием в черноморских гидробионтах, ниже на 6-7 порядков безопасного экологического предела доз, принятого МАГАТЕ как не вызывающего негативные последствия в популяциях гидробионтов (4 Гр/год) [9], и согласно концептуальной модели зональности хронического действия мощностей доз ионизирующего излучения Г. Г. Поликарпова [28], относятся к зоне неопределенности.

Дозы, создаваемые плутонием в донных отложениях, ниже экологического предела доз на 4 порядка величин (табл. 4), что указывает на запас радио-

емкости в дозовом эквиваленте [9] в черноморских грунтах на современном этапе. Увеличение концентрации плутония в донных отложениях в пределах этого диапазона при самоочищении водных масс, которое сопровождается депонированием плутония в донные осадки, не приведет к формированию в осадках доз, превышающих экологически безопасный предел доз для гидробионтов.

Заключение

Черноморские донные отложения – основное депо плутония в экосистеме Черного моря, т. к. характеризуются высокими коэффициентами накоп-

ления, имеют высокий фактор радиоемкости, которые обусловлены сочетанием физико-химических свойств плутония и биогеохимическими особенностями Черного моря. Поэтому донные отложения – критическое звено в экосистеме моря, где концентрации плутония превышают таковые в воде в десятки и сотни тысяч раз.

Коэффициенты накопления плутония в донных отложениях составляли $n \cdot 10^5 - n \cdot 10^4$ единиц и уменьшались в ряду: илестые донные отложения > песчаные донные отложения > многоклеточные водоросли > моллюски > рыбы.

Среднегодовой поток плутония в донные осадки на взморье Дуная и в Днепровско-Бугском лимане составил 1278 и 3376, в севастопольских бухтах – около 190-400 и в глубоководной центральной зоне – 18 мБк/м²·год¹ для ²³⁹⁺²⁴⁰Pu.

Фактор радиоемкости донных отложений для Pu в районах с глубинами до 200 м составляет порядка 96-98 %, в котловине Черного моря – около 30 %, что в 3-100 раз выше, чем для цезия и в 10⁴-10⁷ раз выше, чем для стронция, что обеспечивает относительно высокую способность черноморских вод к самоочищению от плутония. В целом, в результате перераспределения в экосистеме Черного моря почти 90 % плутония депонируется в донных осадках и только около 10 % остается в водной толще, в

отличие от Средиземного моря, где порядка 95 % плутония находится в водной толще.

Возрастание концентрации плутония в донных отложениях при увеличении концентрации плутония в воде свидетельствует о том, что в донных отложениях Черного моря не достигнут предел радиэкологической емкости донных отложений.

Эквивалентные среднегодовые дозы, сформированные на современном этапе плутонием в черноморских гидробионтах, ниже на 6-7 порядков безопасного экологического предела доз. Поглощенные дозы, создаваемые плутонием в донных отложениях, ниже экологического предела доз на 4 порядка (табл. 4), что указывает на запас радиоемкости в дозовом эквиваленте [9] в черноморских грунтах в современный период.

Участки дна с илистыми донными отложениями, которые находятся в зонах усиленного поступления плутония чернобыльского происхождения и/или являются зонами усиленного осадконакопления, служат потенциально-критическими зонами загрязнения в отношении плутония, в изученных районах к ним можно отнести приустьевые зоны Дуная, Днепра и Северо-Крымского канала, заиленные районы бухт. Эти зоны в первую очередь должны подлежать радиэкологическому мониторингу.

Автор приносит искреннюю благодарность экспедиционному отряду отдела радиационной и химической биологии за отбор проб гидробионтов и абиогенных компонент черноморских экосистем во время морских и прибрежных экспедиций: Егорову В. Н., Поповичеву В. Н., Стокозову Н. А., Глину С. Б., Мосейченко И. Н. и сотруднику отдела экологии бентоса Ревкову Н. К. за предоставление проб донных отложений из Каркинитского залива Черного моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чернобыльская катастрофа / Под ред. Барьяхтара В. Г. – К.: Наук. думка, 1995. – 473 с.
2. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиэкология после Чернобыля / Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – Москва: Мир, 1999. – 511 с.
3. Поликарпов 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. – Севастополь: НПЦ «Экоси-гидрофизика», 2008. – 667 с.
4. Поликарпов Г. Г., Ааркрос А. Источники радиоактивного загрязнения окружающей среды в России, Украине, Казахстане // Радиобиология. – 1993. – Вып. 1. – С. 15-24.
5. Talvite N. A. Radiochemical determination of plutonium in environmental and biological samples by ion exchange // Analytical Chemistry, 1971. – V. 43, №13. – P. 1827-830.
6. Павлоцкая Ф. И., Горяченкова Т. Н., Федорова З. М., Емельянов В. В., Мясоедов Б. Ф. Методика определения плутония в почве // Радиохимия, 1984. – Т. 26, № 4. – С. 260 – 267.
7. Поликарпов Г. Г. Радиэкология морских организмов / Под ред. В. П. Шведова. – М.: Атомиздат, 1964. – 295 с.
8. Blaylock B G., Frank M I., O'Neal B. R. Methodology for estimating radiation dose rates to freshwater biota exposed to radionuclides in the environment // Report ES/ER/TM-78 Oak Ridge Nation. Lab., TN. – 1993. – 10 p.
9. Amiro B. D. Radiobiological dose conversion factors for generic non-human biota used for screening potential ecological impacts // J. Environ. Radioactivity, 1997. – Vol. 33, № 1. – P. 37 – 51.
10. Aarkrog A., Dahlgaard H., Foulquier L., Kutlakhmedov Yu., Kulebakina L. G., Mytternaere C, Nielsen S. P., Polikarpov G. G. On the Variation of Radionuclide Ratios in Chernobyl Debris // Proc. Seminar on Comparative assessment of the environmental impact of radionuclides released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl, 1-5 October 1990, Luxembourg / Ed. by Commission of the EC, Directorate-General XI, Environment, Civil Protection and Nuclear Safety. – Commission of the EC «Radiation protection – 53», Report EUR 13574. – 1991. – P. 507-519.
11. Buesseler K. O., Livingston H. D. Natural and Man-Made Radionuclides in the Black Sea // Radionuclides in the Oceans. Input and Inventories. – IPSN, Editions de Physique. – 1996. – P. 201-217.
12. Sanchez Arthur L., Gastaud J., Noshkin V., Buesseler K. O. Plutonium oxidation states in the southwestern Black Sea: evidence regarding the origin of the cold intermediate layer // Deep Sea Research. – 1991. – Vol. 38, Suppl. 2. – P. S845-S853.
13. Поликарпов Г. Г., Лазоренко Г. Е. Роль донных отложений восстановительной и окислительной зон Черного моря в извлечении радионуклидов из водной среды / Молисмология Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1992. – С. 135 – 143
14. Терещенко Н. Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах / «Ольвийський форум – 2011: стратегії України в геополітичному просторі»: Тези. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Том 7. – с. 47-48.

15. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н.* Морская динамическая радиохемозология. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 176 с.
16. *Томілін Ю. А., Григор'єва Л. І.* Радіонукліди у водних екосистемах південного регіону України: міграція, розподіл, накопичення, доза опромінення людини і контрзаходи. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 260 с.
17. *Трапезников А. В., Трапезникова В. Н.* Радиоэкология пресноводных экосистем. – Екатеринбург: УрО РАН, 2006. – 390 с.
18. *Gulin S. B., Egorov V. N., Polikarpov G. G., Osvath I., Stokozov N. A., Mirzoeva N. Yr., Tereshenko N. N., Gulina L. V., Proskurin V. Yr.* Radiotracers in the Black Sea: a tool for marine environmental assesments / Intern. Sympos. on Isotopes in Hydrology, Marine ecosystems and Climet Change Studies: Abstr., (2011; Monaco). – Viena, 2011. – IAEA-CN-186. – P. 217
19. *Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide Levels in Oceans and Seas.* – 2005. – Austria: IAEA. – 187 p.
20. *Скопінцев Б. А.* Формирование современного химического состава вод Черного моря. – Л: Гидрометеоздат, 1975 – 336 с.
21. *Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И.* Геохимия Черного моря. – Киев: Наук. думка, 1982. – 144 с.
22. *Медфодьева М. П., Крот Н. Н.* Соединения трансурановых элементов. – М: Наука, 1987. – 302 с.
23. *Трансурановые элементы в окружающей среде / Под ред. Т. Хенсона.* – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 344 с.
24. *Гулин С. Б., Поликарпов Г. Г., Егоров В. Н., Коротков А. А.* Геохронологическая оценка радиоактивного загрязнения Черного моря // Чтения памяти Н. В. Тимофеева-Ресовского: 100-летию со дня рождения Н. В. Тимофеева-Ресовского посвящается. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика. – 2000. – С. 88–99.
25. *Терещенко Н. Н.* Радионуклиды плутония в компонентах прибрежных черноморских экосистем в акватории Севастополя // Наукові записки. – 2005. – Серія біологія. – № 4 (27). – С. 243 – 247.
26. *Терещенко Н. Н., Поликарпов Г. Г., Лазаренко Г. Е.* Радиоэкологическая ситуация в Черном море в отношении плутония: уровни загрязнения компонентов экосистемы и дозовые нагрузки на биоту // Мор. Экол. Журн., 2007. – Т. VI, № 2. – С. 25 – 38.
27. *Терещенко Н. Н., Поликарпов Г. Г.* Радиационно-экологическая ситуация в Черном море в отношении ^{238,239,240}Pu после Чернобыльской аварии по сравнению с некоторыми другими водоемами в 30-км зоне Чернобыльской АЭС и за ее пределами / Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин. – Нижневартовск, 2007. – Вып. 10. – С. 12 –29.
28. *Polikarpov G. G.* Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionising radiation in the environment // Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – Vol. 75, № 1–4. – P. 181–185.

Рецензенти: Єгоров В. М, чл.-кор. НАН України, д.б.н., професор;
Лазаренко Г. Є., д.б.н., с.н.с.

© Терещенко Н. Н., 2011

Стаття надійшла до редколегії 08.06.2011 р.