УДК 504.054(262)

Терещенко Н.Н., Поликарпов Г.Г.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ РАДИОЭКОЛОГИЯ ПЛУТОНИЯ В АКВАТОРИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ МОРСКИХ И ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ В ПОСТЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ ПЕРИОД

Были проведены определения концентрации радиоизотопов плутония в морской воде, донных отложениях, многоклеточных водорослях, двухстворчатых моллюсках и рыбах. Выполнены расчеты коэффициентов накопления плутония черноморскими донными отложениями и гидробионтами. Уровни поглощенных и эквивалентных доз, сформированные $^{239+240}$Pu в черноморских гидробионтах, были оценены и проведено их сравнение с уровнями доз, сформированными $^{239+240}$Pu в гидробионтах в некоторых других морских и пресноводных екосистемах, а также с дозовыми уровнями, сформированными $^{239+240}$Pu и ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{90}Sr в гидробионтах отдельных непроточных водоемов чернобыльской зоны.

Ключевые слова: *радиоэкологическая ситуация, Черное море, альфа-радиоизотопы плутония, коэффициенты накопления, донные отложения, водоросли, моллюски, рыбы, дозовые нагрузки.*

Було проведено визначення концентрації радіоізотопів плутонію в морській воді, донних відкладах, багатоклітинних водоростях, двостулкових молюсках і рибах. Проведено розрахунки коефіцієнтів нагромадження плутонію чорноморськими донними відкладами та гідробіонтами. Рівні поглинутих та еквівалентних доз, сформованих $^{239+240}$Pu в чорноморських гідробіонтах були оцінені та проведено їх порівняння з рівнями доз, сформованими $^{239+240}$Pu в гідробіонтах деяких інших морських та прісноводних екосистем, а також з дозовими рівнями, сформованими $^{239+240}$Pu та ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{90}Sr в гідробіонтах окремих стоячих водойм чорнобильської зони.

Ключові слова: *радіоекологічна ситуація, Чорне море, альфа-радіоізотопи плутонію, коефіцієнти накопичення, донні відклади, водорості, моллюски, риби, дозові навантаження.*

The Pu radioisotopes concentrations in the seawater, bottom sediments, multicellular algae, mussels and fishes are determined. Concentration factors of plutonium for the Black Sea bottom sediments and hydrobionts are calculated. Absorbed and equivalent dose rates formed by $^{239+240}$Pu on the Black Sea hydrobionts are estimated and compared with dose rates formed by $^{239+240}$Pu on hydrobionts from some other sea and fresh-water ecosystems and also with dose rates formed by $^{239+240}$Pu and ^{241}Am, ^{137}Cs, ^{90}Sr on hydrobionts from some fresh-water reservoirs in Chernobyl zone.

Key words: *radioecologycal situation, Black sea, alpha-radioisitopes of plutonium, concentration factor, bottom sediments, algae, mussels, fish, dose loadings.*

Введение

После аварии на Чернобыльской АЭС радиоактивное загрязнение, включая радиоизотопы плутония (Pu), поступило в водные экосистемы. Альфа-радионуклиды Pu входят в состав основных техногенных дозообразующих радиоизотопов.

Так как наибольшее промышленное и радиоэкологическое значение имеют альфа-радиоизотопы

плутония и особенно ^{239}Pu, то для оценки радиоэкологической ситуации в водных экосистемах важно знать не только распределение радионуклидов в разных компонентах экосистемы [3, 6-8, 14, 16], но и дозовые нагрузки, формируемые ими для различных таксономических групп гидробионтов. Поэтому целью нашей работы была оценка дозовых уровней и сравние радиоэкологической ситуации в акваториях в Черном море и других водоемах, подверженных антропогенному влиянию в пост-чернобыльский период в отношении техногенных альфа-радиоизотопов плутония $^{238, 239, 240}$Pu.

Материалы и методы исследований

Отбор проб абиогенных (вода, донные отложения) и биогенных (водоросли, моллюски, рыбы) компонент экосистем в Черном море осуществляли в период с 1998 по 2007 гг. Автор выражает искреннюю признательность сотрудникам отдела радиационной и химической биологии ИнБЮМ НАН Украины, осуществлявшим отбор проб во время экспедиций: Егорову В.Н., Поповичеву В.Н., Стокозову Н.А., Мосейченко И.Н., Малаховой Л.В. Для расчета дозовых нагрузок на гидробионты из других водоемов использовали литературные данные.

Определение содержания $^{239, 240}$Pu ^{238} Pu в природных образцах были выполнены с использованием радиохимических методик [4, 20]. Измерение изотопов плутония производили на альфа-спектрометре «EG & G ORTEC OCTETE PC». Для контроля химического выхода использовали ^{242}Pu. Ошибка определения $^{239, 240}$Pu не превышала 20 %.

Годовые поглощенные дозы от $^{239, 240}$Pu рассчитывали по формуле (1), согласно известным подходам [9, 10]:

$$D_п = 5.04 \cdot 10^{-6} \cdot C_{орг} \cdot E, \quad (1)$$

где: $D_п$ – поглощенная доза, получаемая в течение года, Гр; $C_{орг}$ – концентрация радиоизотопа в организме, Бк·кг$^{-1}$ сырой массы; E – энергия альфа-частиц излучения радиоизотопа, МэВ.

Результаты и обсуждение

Рассчитанные годовые поглощенные дозы внутреннего облучения, создаваемые альфа-излучением ^{239,240}Pu, в целом варьировали в пределах 0,01-0,354 мкГр для черноморских гидробионтов [8]. Оценивались также эквивалентные дозы, так как для альфа-излучения коэффициент качества равен 20. Пределы изменений доз у черноморских гидробионтов, обитавших в разных прибрежных районах моря, представлены в табл. 1. Расчеты выполнены нами по нашим и литературным данным [7, 8, 14]. Содержание ^{238}Pu в черноморских гидробионтах было ниже предела детектирования [7, 8].

В акватории Севастополя у Крымского побережья и у Кавказских берегов абсолютные значения доз отличались в разных районах моря для одних и тех же групп гидробионтов (что обусловлено, вероятно, разными уровнями радиоизотов в воде [14]), но наблюдалась общая тенденция изменения доз между разными таксонами. Дозовые нагрузки от ^{239,240}Pu для разных таксономических групп уменьшаются более чем на порядок в ряду: многоклеточные водоросли > двустворчатые моллюски > рыбы (табл. 1).

Таблица 1

Максимальные и минимальные поглощенные ($D_п$) и эквивалентные ($D_{экв}$) дозы, от альфа-излучения инкорпорированных радиоизотопов ^{239,240}Pu

Район отбора проб	Объект исследования	$D_п$, мкГр·год$^{-1}$		$D_{экв}$, мкЗв·год$^{-1}$	
		min	max	min	max
У Крымского побережья	Cystoseira crinita	0,026	0,129	0,52	2,58
	Ulva rigida	0,031	0,071	0,62	1,42
	Mytilus galloprovincialis	0,020	0,049	0,40	0,98
	Trachurus mediterraneus ponticus	0,016	0,016	0,32	0,32
	Merlangus merlangus euxinus	0,010	0,016	0,20	0,32
	Sprattus sprattus phalericus	0,016	0,029	0,32	0,58
У Кавказского побережья	Cystoseira barbata	0,168	0,354	3,36	7,08
	Mytilus galloprovincialis	0,039	0,062	0,78	1,24
	Trachurus mediterramium ponticus	0,010	0,047	0,20	0,94
	Sprattus sprattus phalericus	0,010	0,013	0,20	0,26

Сравнительный анализ уровней доз, сформированных ^{239,240}Pu в гидробионтах Черного моря и рекомендуемых предельно допустимых доз показал, что уровни доз от ^{239,240}Pu в черноморских гидробионтах в $n \cdot 10^6$-10^7 раз ниже предела доз, рекомендуемых МАГАТЭ как безопасные для биоты [13], которые не вызывают негативных последствий в природных популяциях гидробионтов.

Так как периоды полураспада ^{239,240}Pu составляют многие годы, то внутреннее облучение гидробионтов от этих радионуклидов можно рассматривать как хроническое. Согласно радиохемоэкологической концептуальной модели зон экологического воздействия хронического облучения [16], дозовые нагрузки от ^{239,240}Pu для черноморских гидробионтов не достигали уровней доз, характерных для «зоны радиационного благополучия» и относятся к «зоне неопределенности».

Вклад ^{239,240}Pu в формировании радиационно-экологической ситуации в морях, подверженных в разной степени антропогенному влиянию [20], рассмотрен на примере доз в двустворчатых моллюсках рода *Mytilus* из этих морей (табл. 2). Расчеты выполнены по нашим и литературным данным о концентрациях плутония в моллюсках в Черном [7, 8, 14], Средиземном [15, 18], Балтийском [11], Ирландском [12], Японском морях [21] и в воде этих морей [14, 20]. Самые

высокие дозы наблюдались в Ирландском море, что, очевидно, обусловлено усиленным радиоактивным антропогенным загрязнением акваторий этого моря от региональных источников, а самые низкие – в Балтийском и Черном морях.

Таблица 2

Концентрации ^{239,240}Pu в воде и моллюсках, коэффициенты накопления плутония ($К_Н$) и годовые уровни доз от его альфа-излучения для двустворчатых моллюсков рода *Mytilus* в различных морях

Название моря	Концентрация ^{239,240}Pu		$К_Н$	Годовая поглощенная доза, мкГр	Годовая эквивалентная доза, мкЗв
	в воде, мБк·м$^{-3}$	в моллюсках, мБк·кг$^{-1}$ сырой массы			
Ирландское	100-900	7,4-450	800	10,94	218,8
Средиземное	14,4	41-83	430	1,13	22,6
Японское	3,5-9,1	5,02	760	0,13	2,6
Черное	5,3	1,9-2,4	460	0,062	1,24
Балтийское	3,4	1,1-2,6	400	0,034	0,68

Получаемые гидробионтами дозы внутреннего облучения от ^{239,240}Pu зависят от уровня антропогенной нагрузки в акватории, т. е. от концентрации ^{239,240}Pu в воде и аккумулирующей способности моллюсков в отношении плутония. Значительные величины коэффициентов накопления плутония двустворчатыми моллюсками рода *Mytilus* (составлявшие от 400 до 800 единиц) способствовали увеличению уровня доз более чем на два порядка по сравнению с уровнями радиоактивного загрязнения водной среды (табл. 2).

Эквивалентные годовые дозы от ^{239,240}Pu в моллюсках, без учета воздействия других дозообразующих факторов, на 4-6 порядков ниже предела безопасных доз [13]. Согласно радиохемоэкологической концептуальной модели зон экологического воздействия хронического облучения [16], они относятся к диапазону доз, характерных для «зоны радиационного благополучия» (Ирландское) и «зоны неопределенности» (Средиземное, Японское, Черное и Балтийское моря) (Рис. 1).

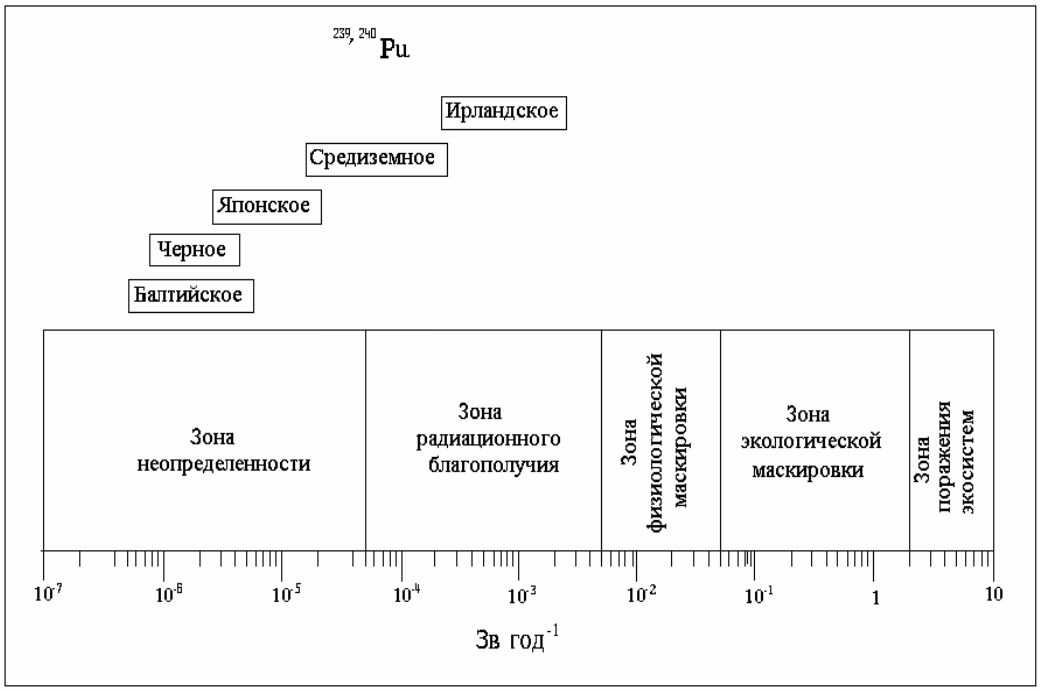

Рис. 1. Сравнительная характеристика современной радиационно-экологической ситуации в Черном и акваториях других морей, подверженных антропогенному радиоактивному загрязнению, для гидробионтов в отношении ^{239,240} Pu

Таким образом, на современном этапе Черное море относится к числу мало загрязненных плутонием морей. По степени уменьшения уровня доз, от ^{239,240}Pu в гидробионтах, рассмотренные моря можно расположить в ряд: Ирландское > Средиземное > Японское > Черное > Балтийское море. Оставаясь на многие сотни лет регистрируемым фактором среды, создающим современные хронические дозовые нагрузки для гидробионтов, содержание ^{239,240} Pu в Черном море не оказывает повреждающего действия на биологические компоненты черноморских экосистем.

Особый интерес представляют пресноводные экосистемы, подвергшиеся радиоктивному загрязнению. Дозовые нагрузки для гидробионтов определяются, при прочих равных условиях,

уровнями содержания Pu в водной среде. Поэтому мы рассматривали изменение дозовых нагрузок для гидробионтов, учитывая пятнистость распределения Pu в пределах 30-километровой зоны ЧАЭС, пространственную удаленность водоема от зоны аварии и временной фактор (табл. 3, 4).

Таблица 3

Уровни годовых поглощенных ($D_п$) и эквивалентных ($D_{экв}$) доз от ^{238}Pu и ^{239,240}Pu для гидрофитов из пресноводных водных экосистем, разноудаленных от места аварии в 1989-1990 гг, по данным работ [3, 16]

Место отбора проб	Объект исследования	$D_п$ от радионуклидов плутония, мГр			$D_{экв}$ от $^{238, 239, 240}$Pu, мЗв
		^{238}Pu	$^{239, 240}$Pu	^{238,239,240}Pu	
Пруд-охладитель ЧАЭС	*Cladophora granulata*	0,078	0,127	0,205	4,10
	– ″ –	0,427	1,051	1,478	29,56
	Cladophora fracta	0,868	1,566	2,434	48,68
	Zignemaceae	0,22	0,413	0,633	12,66
Старик реки с. Копачи	*Cladophora fracta*	0,485	1,009	1,494	29,88
р. Припять, г. Чернобыль	*Cladophora fracta*	0,089	0,156	0,245	4,90
	Potamogeton sp.	0,571	0,970	1,541	30,82
	Lemna minor	–	–	0,091	1,82
Киевское водохранилище	*Cladophora sp.*	–	–	0,031	0,62
	Potamogeton sp.	–	–	0,019	0,37
Каховское водохранилище	*Cladophora sp.*	–	–	0,008	0,16
	Potamogeton sp.	–	–	0,005	0,09

Как и предполагалось, на величине доз для водных растений в водоемах 30-километровой зоны вокруг ЧАЭС сказывалась пятнистость распределения радиоактивных выпадений и, как следствие, в пределах одного водоема у представителей одного рода сформировались дозы на порядок и более отличавшиеся между собой (например, у представителей рода *Cladophora*).

Этими же причинами обусловлен и тот факт, что, несмотря на разную удаленность этих водоемов от ЧАЭС, уровни доз достаточно близки. При рассмотрении радиационно-экологической ситуации в более удаленных водоемах (Киевское и Каховское водохранилища) решающим фактором становилось расстояние объекта от зоны ЧАЭС, и с увеличением расстояния уровни доз уменьшались на два порядка и более (табл. 3).

С течением времени после аварии на ЧАЭС, вследствие процессов дальнейшего перераспределения Pu внутри водных экосистем (основным процессом являлось осаждение в донные отложения) и с резким уменьшением выноса плутония из 30-километровой зоны ЧАЭС, к началу 90-х годов XX века дозы для гидробионтов уменьшились на порядки величин (табл. 4).

Таблица 4

Изменение во времени годовых эквивалентных доз от $^{238, 239, 240}$Pu для водных растений пруда-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ после аварии на ЧАЭС, по данным работ [3, 16]

Место отбора проб	Объект исследования	Годовые эквивалентные дозы от $^{238, 239, 240}$Pu, мЗв				
		1988 год	1989 год	1990 год	1991 год	1992 год
Пруд-охладитель ЧАЭС	*Cladophora fracta*	47,80	–	0,42	0,36	0,47
	Potamogeton sp.	–	–	0,31	0,27	0,42
Киевское водохранилище, у села Страхолесье	*Cladophora sp.*	–	–	0,62		0,36
	Potamogeton sp.	–	–	0,37	0,31	0,16
	Myriophyllum sp.	–	0,42	0,42	0,11	0,21
Каховское водохранилище, низовье	*Cladophora sp.*	0,22	0,02	0,08	–	–
	Potamogeton sp.	0,09	0,04	–	–	–

Но при этом в застойных водоемах 30-километровой зоны ЧАЭС, подвергшихся самому сильному загрязнению и сохранившим высокие уровни радиоактивного загрязнения, мощности доз для гидробионтов от $^{238, 239, 240}$Pu к началу XXI века остались столь же высокими, как и в первые годы после аварии. Они составили в среднем десятки мЗв·год$^{-1}$ для водной растительности и моллюсков и несколько десятых мкЗв·год$^{-1}$ для мирных рыб (табл. 5). Эти расчеты выполнены нами по данным работ [1, 2].

Таблица 5

Уровни мощностей доз (min – max) для гидробионтов в наиболее загрязненных непроточных водоемах 30-километровой зоны отчуждения вокруг ЧАЭС (озеро Далекое и Глубокое) на современном этапе, по данным работ [1, 2]

Объекты исследования	Мощность поглощенной дозы, мГр·год$^{-1}$	Мощность эквивалентной дозы, мЗв·год$^{-1}$
Высшие водные растения	0,010-1,699	0,20 – 33,98
Брюхоногие моллюски	0,008 – 2,013	0,16 – 40,26
Мирные рыбы	0,029 – 0,036	0,58 – 0,72

Поэтому на современном этапе уровни годовых эквивалентных доз для гидробионтов от $^{238,\,239,\,240}$Pu в этих водоемах остаются на несколько порядков выше, чем в других водных экосистемах и хотя еще не достигли, но значительно приблизились (без учета дозовых нагрузок от других антропогенных радионуклидов) к предельному уровню безопасных доз [13]. Но в реальных природных условиях радиоизотопы воздействуют не обособленно, и суммарное воздействие от основных дозообразующих антропогенных радионуклидов (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{238,239,240}Pu, ^{241}Am) достигло предела безопасного уровня мощности поглощенных доз, составив в литоральной зоне величины около 3,4 Гр год$^{-1}$ [2, 13]. Если учитывать пятнистость радиоактивного загрязнения и особенности питания и биотопа (например, в донных отложениях находится 90-99 % от всего содержания основных дозообразующих радионуклидов в пресноводных экосистемах), а также коэффициент качества для альфа-радиоизотопов, то уровни эквивалентных доз для гидробионтов достигли или превысили уровни зоны экологической маскировки. Это подтверждает тот факт, что в различных видов в водоемах наблюдались поражающие эффекты на различных уровнях организации: повышенный уровень аберраций хромосом у представителей растений и животных, аномальное разветвление главного стебля, высокий уровень заражения паразитическими грибами и галлообразующими членистоногими у растений. Это существенно снижало темп роста, семенную продуктивность и биомассу гидрофитов. Все эти факты свидетельствовали о неблагоприятной радиационно-экологической ситуации в экосистемах этих водоемов [2, 7].

Согласно радиохемоэкологической концептуальной модели [16] уровни доз от ^{238,239,240}Pu для гидробионтов водоемов 30-километровой зоны составляли дозы, которые относятся к «зоне радиационного благополучия» и «зоне физиологической маски-ровки» (рис. 2). Но дозы, созданные совместным действием основных дозообразующих радионуклидов (^{137}Cs, ^{90}Sr, ^{238,239,240}Pu, ^{241}Am) относятся к «зоне экологической маскировки» и к «зоне поражения экосистем» (рис. 2), вызывая генетические, физиологические и структурные изменения у гидробионтов, что влияло, в свою очередь, и на такие популяционные показатели, как семенная продуктивность и биомасса.

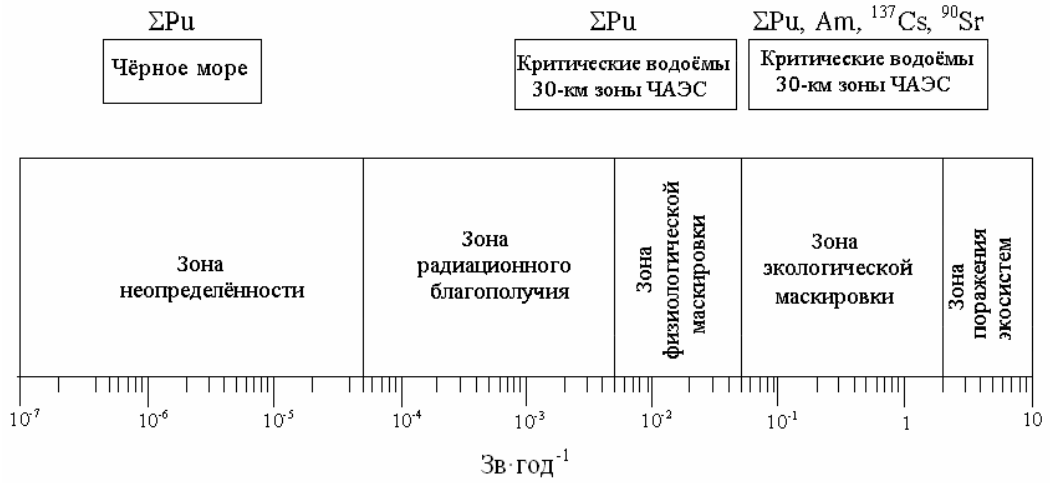

Рис. 2. Сравнительная характеристика радиационно-экологической ситуации в первые годы XXI века в Черном море и в критических водоемах 30-километровой зоны ЧАЭС для гидробионтов в отношении $^{238,\,239,\,240}$Pu и суммарного воздействия основных антропогенных дозообразующих радиоизотопов ($^{238,\,239,\,240}$Pu, ^{241}Am, ^{90}Sr, ^{137}Cs)

Заключение

По результатам проведенного анализа радиационно-экологической ситуации в отношении $^{238,\,239,\,240}$Pu можно заключить:

- уровни доз, обусловленные $^{239,\,240}$Pu в этих морях на 4-6 порядков ниже, рекомендованного МАГАТЭ, предела безопасных доз для популяций гидробионтов;
- оставаясь на многие сотни лет регистрируемым фактором среды, создающим хронические дозовые нагрузки на гидробионты, современное содержание $^{239,\,240}$Pu в Черном море не оказывает

повреждающего действия на биологические компоненты черноморских экосистем;
- по уменьшению уровня доз, сформированных $^{239,\ 240}$Pu в гидробионтах, рассмотренные акватории морей можно расположить в ряд: Ирландское → Средиземное → Японское → Черное → Балтийское море;
- в самых загрязненных стоячих водоемах 30-километровой зоны, в отличие от других водоемов ближней зоны ЧАЭС, юга Украины: Каховского водохранилища и Черного моря, радиационно-экологическая ситуация в отношении $^{238,\ 239,\ 240}$Pu с течением времени, в аспекте уменьшения уровня дозовых нагрузок, изменялась менее выраженно, и к началу XXI века эти водоемы были критическими звеньями среди водных экосистем, в которых гидробионты испытывали сравнительно наиболее высокие дозовые нагрузки в результате радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС;
- радиоизотопы $^{238,\ 239,\ 240}$Pu входят в группу основных дозообразующих антропогенных радионуклидов, которые на современном этапе в критических водоемах в зоне отчуждения вокруг ЧАЭС своим совместным действием сформировали в гидробионтах дозовые нагрузки, вызвавшие поражающие эффекты у представителей водной флоры и фауны на различных уровнях организации и послужили одной из причин неблагоприятной радиационно-экологической ситуации в этих водных экосистемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гудков Д.И., Деревец В.В., Кузьменко М.И. и др. Гидробионты в радиоэкологическом мониторинге водоемов зоны отчуждения ЧАЭС // Гигиена населенных мест. – Киев, 2000. – Вып. 36. – Ч. I. – С. 404-413.
2. Гудков Д.І. Радіонукліди в компонентах водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС: розподіл, міграція, дозові навантаження, біологічні ефекти Автореф. на здобуття наук. ступ. канд. біол. наук. – Київ, 2006. – 31 с.
3. Коротков А.А. Загрязнение отдельных компонентов экосистем Припяти, Днепра и Днепро-Бугского лимана изотопами плутония в результате чернобыльской аварии // Проблемы экологического мониторинга. Материалы Российской радиобиологической научно-практической конференции 26-28 февраля 1991 г. – Брянск, 1991. – Ч. I. – С. 22-23.
4. Павлоцкая Ф.И., Горяченкова Т.Н., Федорова З.М. и др. Методика определения плутония в почве // Радиохимия, 1984.– Т. 26. – № 4.– С. 260-267.
5. Поликарпов Г.Г., Цыцугина В.Г. Изучение последствий аварии на Чернобыльской АЭС для гидробионтов (1986-1996) // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1996. – 36. – Вып. 4. – С. 460-468.
6. Терещенко Н.Н. Изучение содержания радионуклидов плутония в донных отложениях Стрелецкой бухты // Междунар. конф.: Радиационная безопасность территорий. Радиоэкология города. Москва 24-26 ноября 2003 г. Тез. докл. – Москва: Изд-во Рос. универс. Дружбы народов, 2003. – С. 46-47.
7. Терещенко Н.Н. Радионуклиды плутония в компонентах прибрежных черноморских экосистем в акватории Севастополя // Наукові записки. – Серія біологія . – 2005. – № 4 (27). – С. 243-247.
8. 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.
9. Amiro B. D. Radiobiological dose conversion factors for generic non-human biota used for screening potential ecological impacts // J. Environ. Radioactivity, 1997. – 33, N 1. – P. 37-51.
10. 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.
11. Charles D., Jones M., Cooper J. R. Radiological impact on EC Member States of routine discharges into North European water – Report of Working Group IV of CEC Project MARINA. NRPB Report, NRPB-M172, Chilton, Didcot, 1990. – 174 p.
12. Crowley M., Mitchell P. I., O'Grady J. et al. Radiocaesium and plutonium concentrations in *Mytilus edulis* (L.) and Potential dose implications for Irish critical groups // Ocean and Shoreline Management. – 1990. – 13. – P. 149-161.
13. Effects of ionizing radiation on plants and animals at levels implied by carrent radiation protection standards / IAEA Technical report. – Series N 332: International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna, 1992.
14. Marine Environmental Assessment of the Black Sea: Working Material. – Austria. – Vienna: Produced by IAEA, 2004. – 358 p.
15. Othman I., Yassine T., Bhat LS. The measurement of some radionuclides in the marine coastal environment of Syria // Radiologycal Impact Assessment in the Southeastern Mediterranean Area / Ed. Vosniakos F.K., Cigna A.A., Foster P. et al. – Thessaloniki, 2000. – II. – P. 379-384.
16. Polikarpov G.G. Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems in all possible dose rates of ionizing radiation in the environment // RADOC 96-97, Norwich / L;westoft, 8-11 April, 1997. Radiation Protection Dosimetry. – 1998. – 75. – N 1-4. – P. 181-185.
17. Polikarpov G.G., Kulebakina L G., Timoshchuk V.I. et al. Radionuclides migration in the Dnepr River Cascade, the Dnepr-Bug Estuary and the Black Sea shallow-waters // Biogeochemical Pathways of Artificial Radionuclides: SCOPE-RADPATH, 12-20 April, 1991. – RE.40.91 – 1991. – P. 16.
18. Sanchez-Cabeza J. A., Molero J. Plutonium, americium and radiocesium in the marine environment close to the Vandellos I nuclear power plant before decommissioning // J. Environ. Radioactivity. – 2000. – 51. – P. 211-228.
19. Talvitie N.A. Radiochemical determination of plutonium in environmental and biological samples by ion exchange // Analitical Chemistry, 1971.– V. 43. – N. 13. – P. 1827-830.
20. Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide Levels in Oceans and Seas. – Austria: IAEA, 2005. – 187 p.
21. Yamada M., Aono T., Hirano S. $^{239+240}$Pu and ^{137}Cs concentrations in fish, cephalopods, crustaceans, shellfish and algae collected around the Japanese coast in the early 1990s // The Science of the Total Environment. – 1999. – 239. – P. 131-142.

Рецензенти: Єгоров В.М., чл.-кор. НАН України, проф., д.б.н.;
Лазоренко Г.Є., ст.н.ст., к.б.н.

© Терещенко Н.М., Полікарпов Г.Г., 2009

Стаття надійшла: 18.04.2009 р.