

УДК 504.054 (262.5)

БАРЬЕРНАЯ РОЛЬ ЧЕРНОГО МОРЯ В ОТНОШЕНИИ $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – ОСНОВНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ДОЗООБРАЗУЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПОСТЧЕРНОБЫЛЬСКИЙ ПЕРИОД

Терещенко Н. Н., Поликарпов Г. Г., Крылова Т. А.

Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского НАН Украины, Севастополь, natalter@ukr.net

Представлены результаты исследований по определению барьерной роли с использованием фактора радиоемкости Черного моря в отношении $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – основных техногенных дозообразующих радионуклидов в постчернобыльский период. Оценены значения фактора радиоемкости для разных глубин моря для этих радионуклидов и значения фактора радиоемкости в отношении плутония для иловых и песчаных осадков. Использование фактора радиоемкости и коэффициентов накопления позволило определить роль различных компонентов экосистемы в формировании ее барьерной роли, а также оценить ее величину для разных радионуклидов и охарактеризовать особенности биогеохимического поведения каждого радионуклида. Это важно как для характеристики и прогноза радиозоологической ситуации, так и для планирования мероприятий по минимизации ущерба в случае аварийного поступления радиоактивного загрязнения в водоем.

Ключевые слова: барьерная роль водоема, фактор радиоемкости, коэффициенты накопления, Черное море, техногенные радионуклиды: $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr .

ВВЕДЕНИЕ

Водные экосистемы играют значительную роль в миграции на большие расстояния техногенных радионуклидов и их перераспределении после поступления радиоактивного загрязнения в окружающую среду. Основными антропогенными дозообразующими радионуклидами в постчернобыльский период служат гамма-радиоизотоп цезия – ^{137}Cs , бета-радиоизотоп стронция – ^{90}Sr и альфа-радиоизотопы плутония – $^{239, 240}\text{Pu}$. С одной стороны, водные экосистемы служат транспортными магистралями для миграции радионуклидов, с другой – являются естественными барьерами-ловушками для радиоактивных изотопов, ограничивая их дальнейший перенос [1–4].

Барьерная роль водных экосистем определяется природой водоема, его абиогенными и биогенными составляющими и физико-химическими, а также биогеохимическими свойствами самих радионуклидов [1–3].

Для радионуклидов, которые депонируются преимущественно в донных осадках (в их числе $^{239, 240}\text{Pu}$ и ^{137}Cs), где и формируется их основной запас в экосистеме, к определяющим факторам относятся – глубина водоема, состав донных осадков, толщина активного слоя осадков, их аккумуляционная способность, интенсивность седиментации, прочность связывания с частицами, трофность водной экосистемы. Но и в пределах одной биогеохимической группы радиоактивных элементов могут наблюдаться значительные различия в их

поведении в экосистеме, в этом случае ведущую роль могут играть физико-химические характеристики радионуклидов или свойства водной среды [1].

Целью нашей работы была сравнительная характеристика фактора радиоемкости для Черного моря в отношении $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr , ^{137}Cs – долгоживущих техногенных радионуклидов, вносящих основной вклад в формирование антропогенной составляющей радиационной ситуации в водных системах Украины в постчернобыльский период.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

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. 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 [5]:

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

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

Оценку F и K_n [5] радионуклидов $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr , ^{137}Cs абиогенными и биогенными компонентами черноморских экосистем производили на основании данных по содержанию радионуклидов в исследуемых объектах на основании собственных исследований и литературных данных [2, 3, 4, 6]. Радиохимические количественные определения были выполнены по ранее описанным методикам [3], отбор проб природных объектов осуществляли в 1986–2010 гг. в разных районах Черного моря.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Предельная величина барьерной функции водоема соответствует радиоемкости водной экосистемы и является важным параметром для оценки радиоэкологической ситуации в экосистеме. Чтобы количественно охарактеризовать барьерную функцию Черного моря, нами были определены факторы радиоемкости для радионуклидов $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr , ^{137}Cs , вносящих основной вклад в формирование антропогенных дозовых нагрузок. Для илистых донных осадков в Черном море фактор радиоемкости в отношении радионуклидов плутония ($F(\text{Pu})$) с глубиной изменялся от 30% до 98%, а для песчаных донных отложений – от 4% до 8%. Изменение значений $F(\text{Pu})$ для илистых и песчаных черноморских донных отложений в отношении плутония с увеличением глубины представлено на рисунке 1. Значение этого параметра выше для илистых осадков, чем для песчаных донных отложений, особенно на глубинах больше 100 м. Это весьма

существенно для аккумуляционных процессов, так как площадь Черного моря с глубинами свыше 100 м составляет около 76% от общей площади моря и там донные отложения представлены исключительно илстыми осадками. Но и на мелководье доля площади песчаных донных отложений незначительна [7], поэтому сравнительные оценки фактора радиоемкости для техногенных радионуклидов проводили именно для илстых черноморских осадков.

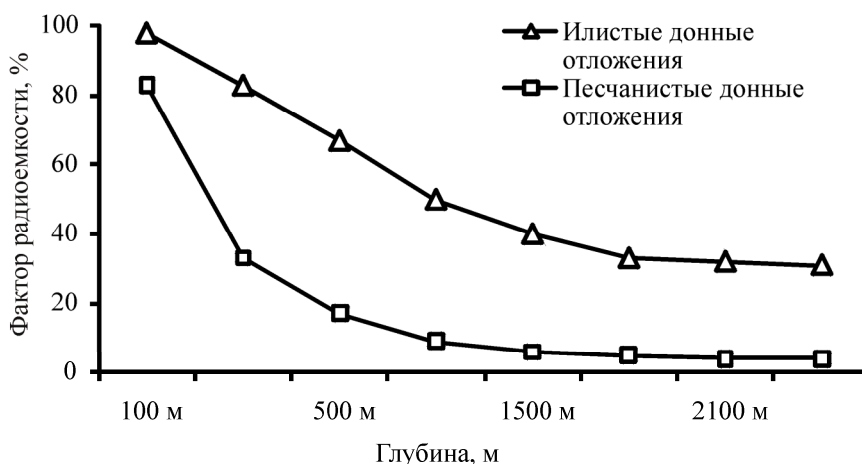


Рис. 1. Изменение фактора радиоемкости в отношении плутония ($F(\text{Pu})$) с увеличением глубины моря для илстых и песчаных черноморских донных отложений

Сравнение величины $F(\text{Pu})$ илстых донных отложений с таковым для радионуклидов стронция и цезия (табл. 1) выявило значительные отличия. В зависимости от глубины $F(\text{Pu})$ был в 3–100 раз выше, чем $F(\text{Cs})$ и в 10^4 – 10^7 раз выше, чем $F(\text{Sr})$. Разница в величине фактора радиоемкости характеризует особенности биогеохимического поведения радионуклида. Стронций остается в воде и перемещается вместе с водными массами (в том числе, за пределы Черного моря), а донными отложениями практически не накапливается [2, 3], поэтому $F(\text{Sr})$ составляет тысячные доли процента и самоочищение водных масс от стронция происходит за счет выноса с водными массами и радиоактивного распада. Следовательно, низкие значения $F(\text{Sr})$ в отношении радионуклида, характеризуют его как гидротропный радионуклид в морской среде, а не эквитропный, как было установлено для пресноводных водоемов [8].

Цезий относится к педотропным радионуклидам в пресноводных системах [8], но его аккумуляция в черноморских донных осадках существенно влияет на перераспределение в системе «вода – донные отложения» только на шельфе (табл. 1). Донные осадки материкового склона и котловины Черного моря накапливают относительно меньшую часть цезия, значительное количество которого остается в водной массе и может мигрировать за пределы водоема [2].

Таким образом, в морской среде такие радионуклиды как цезий, имеющие постоянную степень окисления и не изменяющие сродство ко взвешенным частицам, которым свойственны относительно низкие коэффициенты накопления, характеризуются более высоким фактором радиоемкости, чем гидротропные элементы, но степень очистки водных масс даже на мелководье не превышает 10%. Роль выноса с водными массами и миграция таких радионуклидов за пределы водоема остается существенной, а барьерная функция – низкая [3, 5]. Поэтому цезий в морской воде проявляет свойства эквитропного радиоизотопа, а не педотропного, как это характерно для пресноводных экосистем [8].

В отличие от F(Sr) и F(Cs) для F(Pu) характерны высокие значения. Они свидетельствуют об особенностях биогеохимического поведения этого радионуклида в черноморских экосистемах, как поливалентного элемента в водоеме с анокисической зоной и приустьевыми барьерными зонами и отражают суммарное влияние условий водой среды и свойств самого радионуклида на этот интегральный показатель (табл. 1).

Таблица 1

Фактор радиоемкости (F, %) илистых донных отложений Черного моря в отношении радионуклидов $^{239+240}\text{Pu}$ [4], ^{137}Cs и ^{90}Sr [2]

Глубина, м	Площадь дна моря		F, %		
	км ²	%	$^{239+240}\text{Pu}$	^{137}Cs	^{90}Sr
0 – 100	101452	24,1	98	10	10^{-3}
100 – 200	11400	2,7	83	3	10^{-4}
200 – 500	14610	3,5	67	0,3	10^{-5}
500 – 1000	21220	5,0	50	10^{-1}	10^{-5}
1000 – 1500	33480	8,0	40	10^{-1}	10^{-5}
1500 – 2000	86571	20,6	33	10^{-2}	10^{-5}
2000 – 2100	40765	9,7	32	10^{-2}	10^{-5}
2100 – 2200	94551	22,5	31	10^{-2}	10^{-5}
2200	16270	3,9	31	10^{-2}	10^{-6}

В постчернобыльский период в Черном море ведущую роль в аккумуляции донными осадками плутония играли целый ряд факторов. Состав донных отложений (наличие илистой фракции); расстояние от устья основных пресноводных водотоков (в случае аварии на ЧАЭС в западной части моря – устья Днепра и Буга, Дуная, Северо-Крымского канала); наличие биогеохимических барьеров в устьевых зонах пресноводных водотоков – градиент pH, солёности, соосаждение с элементами, изменяющими форму своего нахождения в водной толще в барьерной зоне, в частности, с марганцем и железом, которые из растворенной формы переходят во взвешенную форму. Повышение продуктивности вод за счет алохтонных биогенов, привносимых с пресноводным стоком, и, как следствие, увеличение потока биоседиментации. В глубоководной зоне – изменение окислительно-восстановительного потенциала в толще вод (что вызывает

изменение степени окисления плутония и упрочняет связь радионуклидов с частицами, ускоряя седиментацию и препятствует ремобилизации в водную среду); апвеллинг автохтонных биогенов из глубинной толщи черноморских вод и повышение трофности вод с последующим увеличением потока биогенной седиментации. На границе редокс зоны – соосаждение с элементами, изменяющими свою форму пребывания в водной среде (переход из растворимой во взвешенную форму). Все эти процессы определили относительно высокую скорость самоочищения черноморских водных масс от плутония, но при этом радионуклид не выносятся из экосистемы Черного моря, а депонируется преимущественно в донных осадках. В результате происходит относительно быстрое обеднение черноморских вод плутонием и уменьшение его выноса за пределы экосистемы с водными массами, что указывает на значительную барьерную роль Черного моря в отношении радионуклидов плутония и способствует ограничению поступления их в моря средиземноморского бассейна. При этом K_n Pu осадками составляли величины порядка $n \times 10^4 - n \times 10^5$ единиц [4, 6]. Это обусловило характерное только для Черного моря (как водоема с аноксичной глубинной толщей и мезотрофным статусом) перераспределение плутония между водными массами и осадками. В воде остается порядка 10-11 % поступившего в водоем радионуклида, а основное его количество депонируется в донные осадки, в отличие от морей с окислительной глубоководной толщей. Так в Средиземном море около 95% запаса плутония в море сосредоточено в водной толще [3]. Следовательно, в Черном море плутоний ведет себя как типичный педотропный радионуклид.

Из водных масс радионуклиды поступают также в биотические компоненты черноморских экосистем [3]. Интенсивность процессов аккумуляции определяется как свойствами радионуклидов, так и имеет видовую специфичность, зависит от особенностей обмена гидробионтов, элементного состава их отдельных частей, особенно частей с консервативной структурой, которые формируют необменные или медленно обмениваемые фонды радионуклида в организме и к которым относятся, прежде всего, внутренний и внешний скелеты гидробионтов. Так двустворчатые моллюски, обладающие раковинами, и ракообразные, имеющие хитиновые покровы, характеризуются относительно более высокими коэффициентами накопления $^{239+240}\text{Pu}$ и ^{90}Sr . Среди многоклеточных водорослей более высокие K_n плутония, характерные для бурых водорослей, могут быть обусловлены наличием таких соединений, как альгиновые кислоты, которым свойственны ярко выраженные сорбционные свойства [9]. Количественная оценка аккумулирующей функции черноморских гидробионтов показала, что K_n плутония для морской биоты значительно ниже, чем для донных отложений, и они не играют существенной роли в перераспределении радионуклида в целом в черноморских экосистемах и практически не влияют на количественные показатели барьерной функции водоема для всех трех рассматриваемых техногенных радионуклидов. Относительный вклад биогенных компонент экосистемы Черного моря в формировании ее барьерной функции подтверждают абсолютные значения K_n радионуклидов гидробионтами. K_n $^{239+240}\text{Pu}$ и составляли величины $n \times 10^2 - n \times 10^3$ [6], а в отношении ^{137}Cs и ^{90}Sr коэффициенты накопления были еще ниже, чем для плутония и равнялись величинам порядка $n \times 10^1$ и в отдельных случаях $n \times 10^2$ (рис. 2) [2–4, 6].

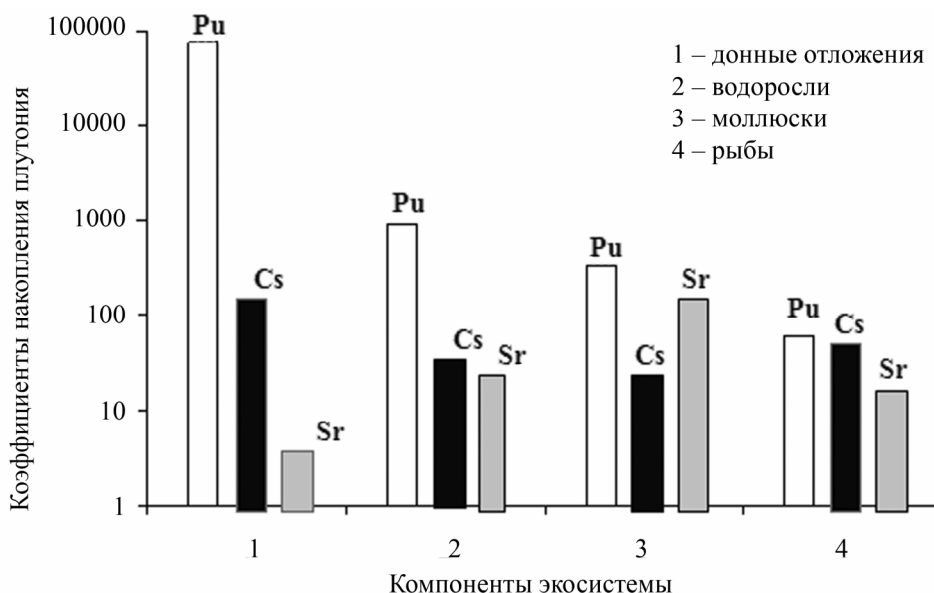


Рис. 2. Сравнительная характеристика коэффициентов накопления (K_n) основных дозообразующих техногенных радионуклидов (^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$) абиотическим и биотическими компонентами черноморских экосистем [2–4, 6]

K_n $^{239,240}\text{Pu}$ донными отложениями на 2–3 порядка превышают таковые для гидробионтов, к тому же биомасса морских организмов составляет малозначимую часть (порядка одной миллионной доли) в экосистеме. Поэтому, в отличие от пресноводных мелководных высокопродуктивных экосистем, где биомасса составляет значительную часть экосистемы и вносит существенный вклад в формирование барьерной роли водоема [10], в Черном море для экосистемы в целом гидробионты не играют существенной роли в депонировании плутония, но их роль может иметь существенное значения в локальных мелководных акваториях, так как концентрации $^{239,240}\text{Pu}$, например, в макрофитах могут в тысячи раз превышать его концентрацию в воде. Кроме того, гидробионты увеличивают поток плутония по пищевым цепям вплоть до человека, потребляющего морепродукты, так как K_n $^{239,240}\text{Pu}$ в гидробионтах составляют сотни и тысячи единиц, что соответственно увеличивает содержание радионуклида в единице массы гидробионтов.

Роль гидробионтов в перераспределении ^{137}Cs , ^{90}Sr в экосистеме также весьма ограничена [2, 3]. Даже в прибрежных экосистемах доля ^{90}Sr аккумулированная гидробионтами не превышала 1% от общего содержания радионуклида в экосистеме [3]. Роль донных отложений, как депо этих радионуклидов, уменьшалась от цезия к стронцию (коэффициенты накопления черноморскими осадками радиоцезия составили несколько сот единиц, а радиостронция – несколько единиц) (рис. 2), а относительное содержание радионуклидов в водных массах имело обратную тенденцию – увеличивалось от цезия к стронцию [3].

Таким образом, изучение и совместное сопоставление факторов радиоемкости водоема и коэффициентов накопления техногенных радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239, 240}\text{Pu}$ абиогенными и биогенными компонентами экосистемы позволило определить тип их биогеохимического поведения в экосистеме Черного моря.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Барьерная роль водоема характеризуется величиной фактора радиоемкости. В Черном море для илистых донных отложений, которые составляют большую часть дна на шельфе и занимают глубоководную бенталь, $F(^{239, 240}\text{Pu})$ составлял от 30 до 98% от общего содержания радионуклида в водоеме, $F(^{137}\text{Cs})$ – 0,01–10 %, $F(^{90}\text{Sr})$ – 0,000001–0,001%. В черноморских экосистемах $^{239, 240}\text{Pu}$ проявляет свойства педотропного радионуклида, ^{137}Cs – эквитропного, а ^{90}Sr – гидротропного.

Черноморские донные отложения характеризуются более высокими K_n $^{239, 240}\text{Pu}$ по сравнению с K_n ^{137}Cs , ^{90}Sr . Донным отложениям принадлежит ведущая роль в перераспределении и депонировании плутония в экосистеме Черного моря и формировании величины радиоемкости водоема. Иловые осадки играют роль депо для $^{239, 240}\text{Pu}$, имеют максимальные K_n и наиболее высокие уровни концентраций $^{239, 240}\text{Pu}$ среди других компонентов в экосистеме.

Высокие значения $F(\text{Pu})$, обусловленные целым рядом факторов, вызывают ограничение миграции $^{239, 240}\text{Pu}$ в моря средиземноморского бассейна и определяют барьерную роль Черного моря в переносе плутония в системе «водосборный бассейн Черного моря – Черное море – моря средиземноморского бассейна».

Таким образом, использование фактора радиоемкости и коэффициентов накопления позволяет определить роль различных компонентов экосистемы в формировании ее барьерной функции. Фактор радиоемкости дает возможность оценить ее величину для разных радионуклидов, определить тип биогеохимического поведения конкретного радионуклида. Это важно для характеристики и прогноза радиоэкологической ситуации и для планирования мероприятий по минимизации ущерба, в случае аварийного поступления радиоактивного загрязнения в водоем с учетом особенностей биогеохимического поведения каждого радионуклида.

Благодарности. Авторы выражают искреннюю благодарность экспедиционному отряду отдела радиационной и химической биологии за отбор проб гидробионтов и абиогенных компонентов черноморских экосистем во время морских и прибрежных экспедиций: В. Н. Егорову, В. Н. Поповичеву, Н. А. Стокозову, С. Б. Глину, И. Н. Мосейченко.

Список литературы

1. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / [под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона]. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
2. Молисмология Черного моря / [Г. Г. Поликарпов, О. Г. Миронов, В. Н. Егоров и др.] – К.: Наук. думка, 1992. – 304 с.

3. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / [Г. Г. Поликарпов, В. Н. Егоров, С. Б. Гулин и др.]. – Севастополь: «Экоси-гидрофизика», 2008. – 667 с.
4. Терещенко Н. Н. Ведущая роль донных отложений в перераспределении плутония в черноморских экосистемах / Н. Н. Терещенко // Наукові праці: науково-методичний журнал. – Миколаїв: Вид-во ЧДУ ім. Петра Могили, 2011. – Т. 169, вип. 157: «Техногенна безпека». – С. 63–70.
5. Поликарпов Г. Г. Радиоэкология морских организмов / Г. Г. Поликарпов [под ред. В. П. Шведова]. – М.: Атомиздат, 1964. – 295 с.
6. Терещенко Н. Н. Радиоэкологическая ситуация в Черном море в отношении плутония: уровни загрязнения компонентов экосистемы и дозовые нагрузки на биоту / Н. Н. Терещенко, Г. Г. Поликарпов, Г. Е. Лазаренко // Мор. экол. журн., 2007. – Т. VI, № 2. – С. 25–38.
7. Митропольский А. Ю. Геохимия Черного моря / А. Ю. Митропольский, А. А. Безбородов, Е. И. Овсяный. – К.: Наук. думка, 1982. – 144 с.
8. Тимофеева–Ресовская Е. А. Распределение радионуклидов по основным компонентам пресноводных водоемов / Е. А. Тимофеева–Ресовская // Тр. Ин-та биологии Урал. фил. АН СССР. – 1963. – Вып. 30. – 77 с.
9. Радиоэкология Черного моря / [под ред. Г. Г. Поликарпова и Н. С. Рисика]. – К.: Наук. думка. – 1977. – 232 с.
10. Томілін Ю. А. Радіонукліди у водних екосистемах південного регіону України: міграція, розподіл, накопичення, доза опромінення людини і контрзаходи / Ю. А. Томілін, Л. І. Григор'єва. – Миколаїв: Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2008. – 260 с.

Терещенко Н. М., **Поликарпов Г. Г., Крылова Т. О. Бар'єрна роль Чорного моря відносно $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – основних техногенних дозоутворюючих радіонуклідів в постчорнобильський період** // Екосистеми, їх оптимізація та охорона. Сімферополь: ТНУ, 2012. Вип. 7. С. 243–250.

Представлені результати досліджень визначення бар'єрної ролі з використанням чинника радіємності Чорного моря відносно $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – основних техногенних дозоутворюючих радіонуклідів в постчорнобильський період. Оцінено значення чинника радіємності для різних глибин моря для цих радіонуклідів, а також значення чинника радіємності відносно плутонію для мулових і піскуватих осадів. Використання чинника радіємності та коефіцієнтів накопичення дозволяє визначити роль різних компонент екосистеми у формуванні її бар'єрної ролі, а також оцінити її величину для різних радіонуклідів і охарактеризувати особливості біогеохімічної поведінки кожного радіонукліда, що важливо як для характеристики і прогнозу радіоекологічної ситуації, так і для планування заходів із мінімізації збитку у разі аварійного надходження радіоактивного забруднення у водойму.

Ключові слова: бар'єрна роль водойми, фактор радіємності, коефіцієнт накопичення, Чорное море, техногенні радіонукліди: $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr .

Tereshchenko N. N., **Polikarpov G. G., Krilova T. A. Barrier role of the Black Sea in regard to $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – basic technogenic doseformative radionuclides in a post-chornobyl period** // Optimization and Protection of Ecosystems. Simferopol: TNU, 2012. Iss. 7. P. 243–250.

The results of researches are presented on determination of barrier role with the use of factor of radiocapacity of the Black Sea in regard to $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr – basic technogenic doseformative radionuclides in a post-chornobyl period. The values of factor of radiocapacity are appraised for the different depths of sea for these radionuclides, and also value of factor of radiocapacity in regard to plutonium for silt and sand bottom sediments. The use of factor of radiocapacity and factor of accumulation allows to define the role of different components of ecosystem in forming of its barrier role, and also to estimate its value for different radionuclides and describe the features of biogeochemical behavior of every radionuclide, that it is important both for description and prognosis of radioecological situation and for planning of measures on minimization of damage in case of the emergency entering of radioactive contamination to reservoir.

Key words: the barrier role of the reservoir, factor of radiocapacity, factor of accumulation, the Black Sea, anthropogenic radionuclides: $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{137}Cs , ^{90}Sr .