

Н.Ю.Мирзоева

*Институт биологии южных морей НАН Украины, г.Севастополь*

**$^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  В СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТАХ  
ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС,  
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ САМООЧИЩЕНИЯ ЭКОСИСТЕМ**

Описаны закономерности изменения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде и гидробионтах севавтопольских бухт после аварии на ЧАЭС в период 1986 – 2012 гг. Определены постоянные времени экспоненты уменьшения вдвое концентраций  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах экосистемы севавтопольских бухт. Оценен запас  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, гидробионтах и донных отложениях исследуемых экосистем. Рассчитана скорость и определены биогеохимические факторы самоочищения водной экосистемы севавтопольских бухт от поставарийных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** *Чёрное море, севавтопольские бухты, авария на ЧАЭС, скорость самоочищения, биогеохимические факторы,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , вода, гидробионты, донные отложения.*

В первые месяцы после аварии на ЧАЭС акватория Чёрного моря подверглась острому радиоактивному загрязнению. В мае 1986 г. на поверхность Чёрного моря выпало 1,7 – 2,4 ПБк  $^{137}\text{Cs}$  и 0,3 ПБк  $^{90}\text{Sr}$  [1, 2]. В дальнейшем хроническое поступление поставарийных радионуклидов в речные экосистемы Украины и Чёрное море осуществляется в результате периодических паводков и непериодических паводков [1]. Особенностью чернобыльской аварии было то, что радиоактивное загрязнение окружающей среды произошло на масштабе времени значительно меньшем, чем характерное время протекания биогеохимических процессов. Поэтому поставарийные  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в качестве радиотрассеров могут характеризовать интенсивность гидрологических и биогеохимических процессов, происходящих в водных экосистемах.

Цель работы – выявление закономерностей распределения и миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  после аварии на ЧАЭС в живых и косных компонентах экосистем севавтопольских бухт акватории Чёрного моря в период 1986 – 2012 гг., определение скорости самоочищения водной толщи севавтопольских бухт от поставарийных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи: определить концентрации, изучить динамические тенденции перераспределения, рассчитать запас  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде, гидробионтах и донных отложениях экосистем севавтопольских бухт Чёрного моря; оценить скорость самоочищения и выявить биогеохимические факторы, влияющие на самоочищение экосистем севавтопольских бухт от поставарийных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ .

**Материал и методы исследований.** Объектами исследований служили вода, донные отложения, гидробионты (водоросли *Cystoseira crinita* (Desf.) Bory, моллюски *Mytilus galloprovincialis* Lam., рыбы *Merlangius merlangus euxinus* (Nordmann)), отобранные в севавтопольских бухтах Чёрного моря в период 1986 – 2012 гг. Измерения выполнялись по методикам и на оборудо-

вании, прошедшем интеркалибрацию под эгидой МАГАТЭ (Вена, Австрия). Определение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в исследуемых объектах проводили радиохимическим методом [1, 3 – 5]. Бета-активность  $^{90}\text{Sr}$  измерялась по  $^{90}\text{Y}$ , по черенковскому излучению на низкофоновом жидкостно-сцинтилляционном счетчике (LSC) LKB “Quantulus” Wallac-1220, нижний предел определяемой активности (LLD) составлял 0,01 – 0,04 Бк·кг<sup>-1</sup> (Бк·м<sup>-3</sup>) пробы, относительная погрешность не превышала 20 %. Гамма-спектрометрические измерения  $^{137}\text{Cs}$  проводили на гамма-спектрометрическом комплексе с датчиком *Nal(Tl)* со свинцовой защитой и усилителями *ORTEC 855 Dual Spec AMP*, *Canberra AMP 2026*, а также на торцевом сверхчистом германиевом детекторе *Canberra-Packard XiRa GX2019* с относительной эффективностью около 23 %. Анализ полученных гамма-спектров проводили с помощью анализатора *MCA S100, System 100* [1, 5].

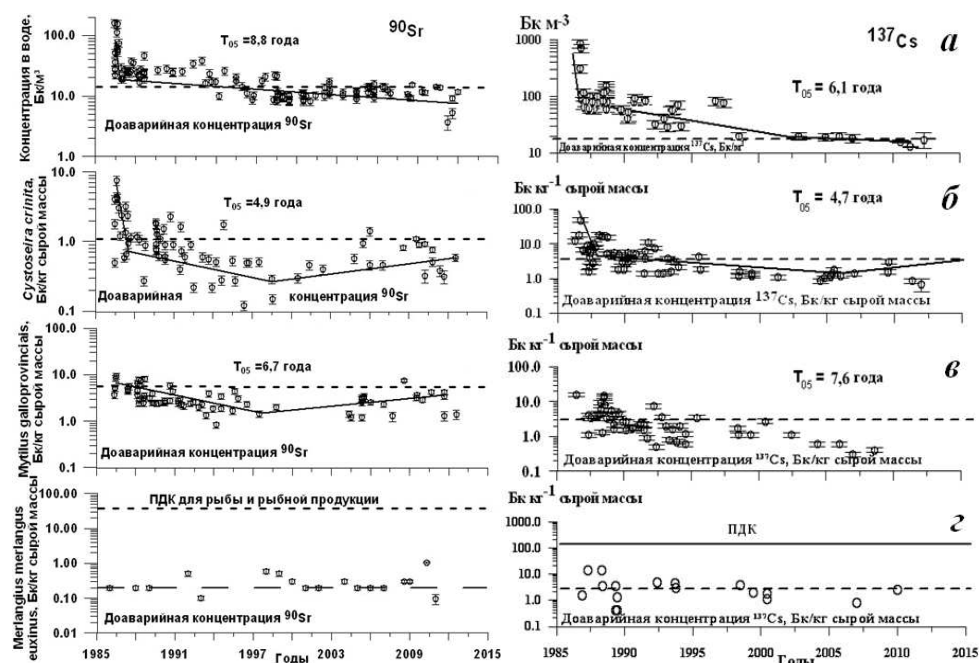
**Результаты исследований и обсуждение.** После аварии на Чернобыльской АЭС в прибрежных акваториях севавтопольских бухт максимальные концентрации  $^{137}\text{Cs}$  достигали 815 Бк·м<sup>-3</sup>,  $^{90}\text{Sr}$  – 157 Бк·м<sup>-3</sup>, превышая в 100 и 10 раз соответственно доаварийную концентрацию этих радионуклидов в черноморской воде (15 Бк·м<sup>-3</sup> и 16 Бк·м<sup>-3</sup>) [1, 2].

Нами получено, что в 1987 – 1998 гг. экспоненциальное снижение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде к доаварийному уровню характеризовалось периодом уменьшения концентрации радионуклида вдвое  $T_{05} = 8,8$  года (рис.1, а ( $^{90}\text{Sr}$ )). К 2012 г. в севавтопольских бухтах отмечалась стабилизация концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде с некоторой тенденцией к росту, что было связано с увеличением его поступления [1, 4, 5] со стоком Днепра и Дуная. Анализ динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в цистозире (*Cystoseira crinita*) севавтопольских бухт в период 1986 – 2012 гг. (рис.1, б ( $^{90}\text{Sr}$ )) показал ее качественное совпадение с тенденциями изменения концентрации радионуклида в воде. Период  $T_{05}$  для цистозир составлял  $T_{05} = 4,9$  г. (рис.1, б ( $^{90}\text{Sr}$ )). Концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в мидиях (*Mytilus galloprovincialis*) (рис.1, в ( $^{90}\text{Sr}$ )) снижались экспоненциально с  $T_{05} = 6,7$  г., что в 4,1 раза меньше физического распада  $^{90}\text{Sr}$ . Отмечено (рис.1, в ( $^{90}\text{Sr}$ )), что, за исключением 1986, 1988 и 1990 гг. [1, 4], концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в раковинах мидий не превышала доаварийные уровни. Для рыб (*Merlangius merlangus euxinus*) экспоненциальной закономерности снижения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  выявлено не было (рис.1, з ( $^{90}\text{Sr}$ )).

После резкого повышения в 1986 г. и быстрого снижения к 1987 г. последовала медленная фаза снижения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в водной среде севавтопольских бухт, зафиксированная с 1987 г.  $T_{05}$  для воды по  $^{137}\text{Cs}$  составляла 6,1 г. (рис.1, а ( $^{137}\text{Cs}$ )). Уменьшение концентрации  $^{137}\text{Cs}$  в *Cystoseira crinita* и *Mytilus galloprovincialis* также было аппроксимировано экспоненциальными функциями с постоянными времени 4,7 и 7,6 года соответственно (рис.1, б, в ( $^{137}\text{Cs}$ )). Для *Merlangius merlangus euxinus* экспоненциальной закономерности снижения концентрации  $^{137}\text{Cs}$  выявлено не было (рис.1, з ( $^{137}\text{Cs}$ )).

Получено (рис.1, в, з), что радиоактивное загрязнение мидий и рыб поставарийными  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  за весь период наблюдений, не превышало ПДК для рыб и рыбной продукции, принятых в Украине [1].

В 2009 – 2011 гг. запас  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составил: в воде 2243,6 МБк и 3890,0 ГБк, в поверхностном слое донных отложений 17,7 МБк и 1,1 ГБк,

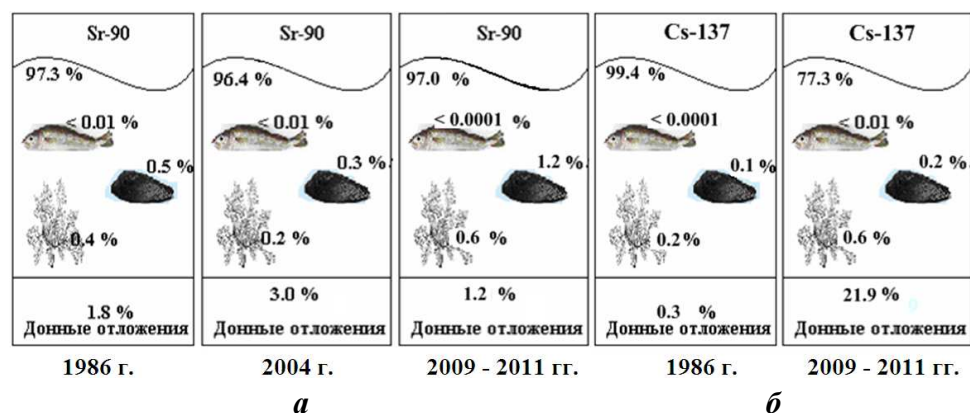


Р и с . 1 . Динамика концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде (а) и гидробионтах (водоросли (б), моллюски (в), рыбы (г)) севастопольских бухт в 1986 – 2012 гг.

в мидиях 27,4 и 8,9 МБк, в водорослях 13,8 и 30,3 МБк, в рыбах 2,8 и 15,8 кБк соответственно [5]. В период 1986 – 2011 гг. общий запас  $^{90}\text{Sr}$  в экосистеме севастопольских бухт уменьшился на 11,1 ГБк или на 83 % от его содержания в бухтах в 1986 г. [5]. Для  $^{137}\text{Cs}$  в период 1986 – 2011 гг. эти оценки составили 145,3 ГБк и 97 %. При этом радиоактивный распад  $^{90}\text{Sr}$  составил 51,0 %, а  $^{137}\text{Cs}$  – 49,8 % от этой величины. Скорости самоочищения воды экосистемы севастопольских бухт от поставарийных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  составляют: для  $^{90}\text{Sr}$   $0,50 \pm 0,08$  ГБк в год, для  $^{137}\text{Cs}$  5,74 ГБк в год. Определено [5], что основными факторами, влияющими на самоочищение экосистемы севастопольской бухты от  $^{90}\text{Sr}$ , являются: радиоактивный распад и водообмен с открытой акваторией моря, для  $^{137}\text{Cs}$ , наряду с указанными факторами, немаловажное значение играет фактор депонирования радионуклида в донные отложения экосистемы.

Получено (рис.2, а), что основной запас  $^{90}\text{Sr}$  (97,3 %) в 1986 г. находился во всем объёме водной массы экосистемы. С течением времени (с 1986 по 2011 гг.) и на фоне уменьшения концентрации исследуемого радионуклида в среде, его процентное распределение по компонентам экосистемы практически оставалось прежним с незначительным увеличением в гидробионтах. В 2009 – 2011 гг. основной запас  $^{90}\text{Sr}$  также находился в водной толще (97,0 %), (рис.2, а).

Процентное содержание  $^{137}\text{Cs}$  в донных отложениях севастопольских бухт (рис.2, б) в 2011 г. практически было равно разнице величин процентного содержания  $^{137}\text{Cs}$  в водной толще севастопольских бухт в 1986 и 2011 г. (рис.2, б). Отметим, что депонирование  $^{137}\text{Cs}$  в донные отложения водной экосистемы и радиоактивный распад радионуклида являются основ-



Р и с . 2 . Процентное распределение общего запаса  $^{90}\text{Sr}$  (а) и  $^{137}\text{Cs}$  (б) в различных компонентах экосистемы севастопольских бухт.

ными процессами, обеспечивающими самоочищение водной толщи морской экосистемы от поставарийного  $^{137}\text{Cs}$ .

**Выводы.** 1. Выявлены закономерности изменения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в воде и гидробионтах севастопольских бухт после аварии на ЧАЭС в 1986 – 2012 гг., которые характеризовались резким повышением концентрации радионуклидов в 1986 г. и экспоненциальным снижением с 1987 г.

2. Определены периоды уменьшения вдвое концентраций  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ : в воде бухт 8,8 и 6,1 года, в бурых водорослях 4,9 и 4,7 года, в моллюсках 6,7 и 7,6 года соответственно. Биогеохимические и гидрологические процессы, происходящие в морских экосистемах севастопольских бухт, уменьшают время нахождения поставарийных радионуклидов в морской среде на 106 – 127 лет.

3. Рассчитаны скорости самоочищения воды экосистем севастопольских бухт от поставарийных  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$ : для  $^{90}\text{Sr}$   $0,5 \pm 0,08$  ГБк в год, для  $^{137}\text{Cs}$  5,7 ГБк в год. Основными факторами, обеспечивающими самоочищение морских экосистем, являются: для  $^{90}\text{Sr}$  – радиоактивный распад и водообмен с открытой акваторией моря, для  $^{137}\text{Cs}$ , наряду с указанными факторами, процесс депонирования радионуклида в донные отложения морской экосистемы.

4. Полученные закономерности распределения и миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в компонентах экосистемы севастопольских бухт Чёрного моря после аварии на ЧАЭС имеют практическое значение для целей прогнозирования последствий для морских экосистем при возможных других аварийных ситуациях. Оценки скорости самоочищения морских экосистем от радиоактивного загрязнения могут служить для обоснований рекомендаций по нормированию допустимых уровней антропогенного влияния при реализации концепции устойчивого развития причерноморских регионов Украины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полицарнов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыругина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В. Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию / Под ред. Г.Г. Полицарнова и В.Н. Егорова. – Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. – 667 с.

2. *Eremeev V.N., Chudinovskikh T.V., Batrakov G.F.* Artificial radioactivity of the Black Sea // UNESCO reports in mariner science: [report].– UNESCO (Paris), 1993.– № 59.– 95 p.
3. *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 // J. Environ. Radioactivity.– 2013.– v.124.– P.50-56.
4. *Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G.* Distribution and migration of  $^{90}\text{Sr}$  in components of the Dnieper River basin and the Black Sea ecosystems after the Chernobyl NPP accident.– 2013.– <http://authors.elsevier.com/sd/article/S0265931X13000489>
5. *Мирзоева Н.Ю., Гулин С.Б., Архипова С.И., Коркишко Н.Ф., Мигаль Л.В., Мо-сейченко И.Н., Сидоров И.Г.* Потоки миграции и депонирования послеварийных радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в различных районах Чёрного моря (элементы биогеохимических циклов) // Наукові праці: Наук.-метод. журн. Серія Техногенна безпека.– Миколаїв, 2013.– вип.198, т.210.– С.45-51.

Материал поступил в редакцию 08.06.2013 г.

**АНОТАЦІЯ** Описано закономірності зміни концентрації  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у воді і гідробіонтах севастопольських бухт після аварії на ЧАЕС у період 1986 – 2012 рр. Визначено постійні часу експоненти зменшення вдвічі концентрацій  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у компонентах екосистеми севастопольських бухт. Оцінено запас  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  у воді, гідробіонтах і донних відкладеннях досліджуваних екосистем. Розраховано швидкість і визначені біогеохімічні фактори самоочищення водної екосистеми севастопольських бухт від післяварійних  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$ .

**ABSTRACT** The regularities of the  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentration changes in the water and hydrobionts of the Sevastopol bays after the Chernobyl NPP accident in the period 1986 – 2012 yrs. were described. The constants time of exponential decrease in twice of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  concentrations in the components of the Sevastopol bays ecosystem were determined. The stock of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  in water, hydrobionts and bottom sediment of the investigated ecosystems was estimated. The speed and biogeochemical factors of the self-purification of aquatic ecosystem of the Sevastopol bays from the after-accidental  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  were calculated.