

УДК: 551.46 09:628.19:551.510.721:574.5 (262.5)

В. Н. ЕГОРОВ, Г. Г. ПОЛИКАРПОВ, Н. Ю. МИРЗОВА,
Л. Г. КУЛЕБАКИНА, Ю. Г. АРТЕМОВ**ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ^{90}Sr И ^{137}Cs В ВОДЕ И ГИДРОБИОНТАХ СЕВАСТОПОЛЬСКИХ БУХТ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС**

Описаны закономерности изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и гидробионтах сева­сто­польских бухт после аварии на ЧАЭС с 1986 г по 1999 г. Установлено, что концентрация ^{90}Sr в воде уменьшается экспоненциально с постоянной времени 6.9 лет, в водорослях 4.0 лет, в мидиях - 6.7 лет, ^{137}Cs - 5.9, 4.4 и 4.3 лет соответственно. Обнаружен феномен снижения коэффициентов накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs гидробионтами во времени. С помощью математической модели показано, что это обусловлено влиянием динамических характеристик концентрирования радионуклидов морскими организмами.

Актуальность исследований радиоактивного загрязнения морской среды обусловлена потребностью оценки и прогноза негативных последствий аварии на ЧАЭС. Радиоэкологический мониторинг Черного моря занимает особое место в научных исследованиях ИнБЮМ, где эти работы были начаты еще в конце 1950-х годов [8]. С 1993 г исследования по радиоэкологическому мониторингу велись в координаторстве с МАГАТЭ по проектам № 7400/R2/RB и RER/2/003.

Цель исследований состояла в определении тенденций изменения содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде, водорослях и моллюсках сева­сто­польских бухт (СБ).

Материал и методика. Карта района исследования представлена на рис. 1.

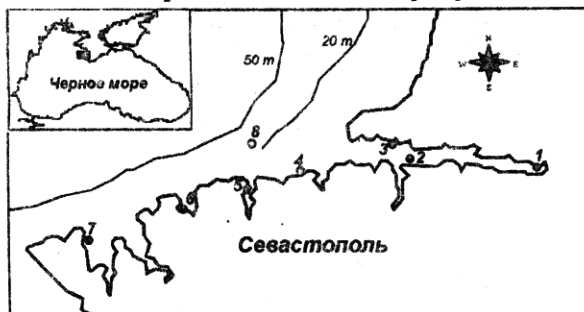


Рис. 1. Карта района работ в системе мониторинга сева­сто­польских бухт

Fig. 1. The map of research area for Sevastopol Bays Monitoring Program

Пробы воды отбирались в основном в точках 1, 2, 4, и 6 - 8. Точки 4, 5 и 7 были реперными для отбора проб водорослей, а точки 3 и 4 - для проб мидий.

Измерения выполнялись по методикам и на оборудовании, прошедшем интеркалибровку под эгидой МАГАТЭ (Вена, Австрия) и Рисо Национальной Лаборатории (Рисо, Дания). Определение ^{90}Sr и ^{137}Cs в морской воде проводили радиохимическим методом [5,12].

Гидробионты обрабатывались по методикам [12]. Бета-активность ^{90}Sr измерялась по ^{90}Y , по черенковскому излучению на низкофоновом жидкостно-сцинтилляционном счетчике "Quantulus" Wallac-1220 с относительной погрешностью не выше 15%. Гамма-спектрометрические измерения ^{137}Cs проводили на гамма-спектрометрическом комплексе с датчиком NaI(Tl) 150x150 мм и анализатором АИ-1024. Относительная погрешность измерений не превышала 20%.

Результаты и обсуждение. Динамика изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и гидробионтах сева­сто­польских бухт иллюстрируется рис. 2 и 3. Видно, что непосредственно после аварии на ЧАЭС, в 1986 г отмечалось сравнительно быстрое снижение радиоактивности вод. В последующем концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в сева­сто­польских бухтах уменьшалась экспоненциально с постоянными времени 6.9 и 5.9 лет (рис. 2а и рис. 3а). Зависимости изменения содержания отмеченных радионуклидов в гидробионтах, аппроксимированные экспоненциальными функциями, показали, что периоды снижения концентрации ^{90}Sr вдвое в бурых водорослях и моллюсках составили 4.0 и 6.7 лет (рис. 2b и рис. 2d), а ^{137}Cs — 4.4 и 4.3 лет (рис. 3b и рис. 3d).

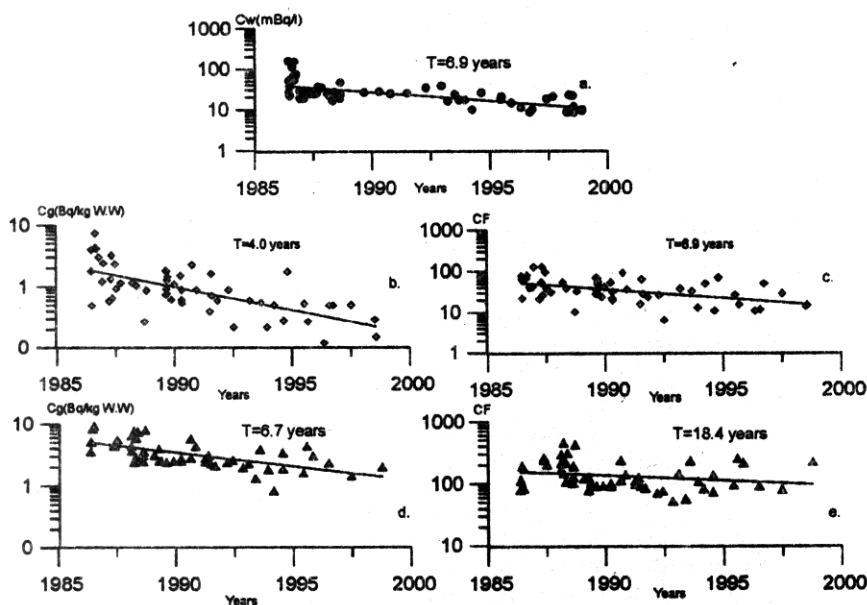


Рис. 2 Динамика системы ^{90}Sr в воде и гидробионтах севастопольских бухт: осредненная концентрация ^{90}Sr в воде (а); концентрация и коэффициент накопления ^{90}Sr водорослями *Cystoseira crinita* (b, c) и моллюсками *Mytilus galloprovincialis* (d, e)
 Fig. 2 Dynamic of the system ^{90}Sr concentration in the Sevastopol bays water - hydrobionts: ^{90}Sr concentration in the Sevastopol bays (a); ^{90}Sr concentration and concentration factor in the algae, *Cystoseira crinita* (b, c) and in the mussel, *Mytilus galloprovincialis* (d, e)

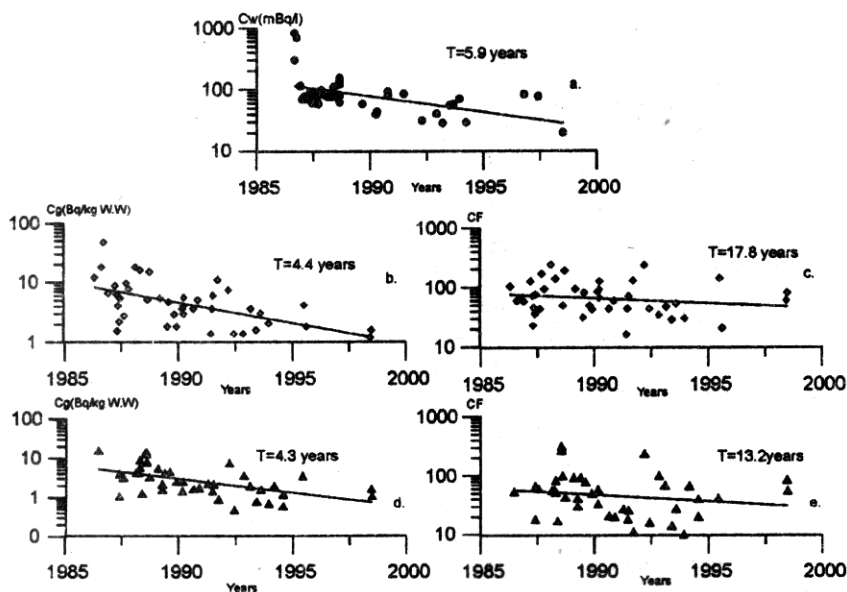


Рис. 3 Динамика системы ^{137}Cs в воде и гидробионтах севастопольских бухт: осредненная концентрация ^{137}Cs в воде (а); концентрация и коэффициент накопления ^{137}Cs водорослями *Cystoseira crinita* (b, c) и моллюсками *Mytilus galloprovincialis* (d, e)
 Fig. 3 Dynamic of the system ^{137}Cs concentration in the Sevastopol bays water - hydrobionts: ^{137}Cs concentration in the Sevastopol bays (a); ^{137}Cs concentration and concentration factor in the algae, *Cystoseira crinita* (b, c) and in the mussel, *Mytilus galloprovincialis* (d, e)

Необходимо отметить, что концентрация ^{90}Sr в воде севастопольских бухт, в среднем, уже достигла доаварийного уровня - 18 Бк/м^3 [7] и продолжает уменьшаться вдвое за каждые 6.9 лет. В то же время в открытой части Черного моря в настоящее время отмечена стационарность содержания ^{90}Sr в слое 0-50 м [10]. Это определяется тем, что его поступление в поверхностные воды моря со стоком рек Днепр, Днестр и Дунай уравнивается оттоком из слоя 0-50 м за счет миграции в глубинные воды и выносом в Мраморное море через пролив Босфор.

До аварии на ЧАЭС концентрация ^{137}Cs в поверхностных водах Черного моря оценивалась в $14-16 \text{ Бк/м}^3$ [1]. После аварии изменение концентрации ^{137}Cs в слое 0-50 м моря имело двухэкспоненциальный характер с постоянными времени 2.3 и 12.5 года [4]. В последующем возрос вклад радиоактивного распада, и в среднем за период с 1987-1995 гг наблюдалось экспоненциальное снижение концентрации ^{137}Cs в поверхностных водах с периодом уменьшения в два раза каждые 5.6 лет [10], что в пределах ошибок аппроксимации совпадает с тенденцией снижения радиоактивности радиоцезия в воде севастопольских бухт с постоянной времени 5.9 лет.

Рис.2 с,е и рис. 3 с,е свидетельствуют о снижении коэффициентов накопления (CF) ^{90}Sr и ^{137}Cs гидробионтами с течением времени. Аналогичный феномен отмечен и для других водоемов [14]. Выяснение причины снижения CF радионуклидов гидробионтами актуально, поскольку в теории мониторинга окружающей среды с использованием биоиндикаторов постулируется линейность связи между содержанием радионуклида в водной среде и гидробионте, и, соответственно, постоянство CF.

Для оценки влияния динамических характеристик на концентрирующую функцию гидробионтов мы использовали двухэкспоненциальную функцию аппроксимации выборки измерений концентрации ^{90}Sr в воде СБ после аварии на ЧАЭС и параметры модели кинетики обмена этого радиоизотопа бурой водорослью *Cystoseira crinita* из этих же бухт в экспериментальных условиях. Аппроксимирующая функция, описывающая динамику изменения концентрации ^{90}Sr в воде СБ, имела следующий вид:

$$C_w(t) = 126.5 \exp(-11.5000(t - t_0)) + 28.5 \exp(-0.0533(t - t_0)), \quad (1)$$

где: C_w - концентрация ^{90}Sr в воде севастопольских бухт в момент времени t ; t_0 - начальный момент времени ($t_0 = 0$ на дату 26.04.1986 г).

Результаты аппроксимации природных наблюдений функцией (1) нанесены сплошной линией на рис.4а.

Дифференциальные уравнения для описания кинетики обмена ^{90}Sr водорослями с учетом их соматического роста имели вид [2, 3]:

$$\begin{aligned} C_{g1}/dt &= C_w B_1 p_1 - C_{g1}(p_1 - P); \\ C_{g2}/dt &= C_w B_2 p_2 - C_{g2}(p_2 - P), \end{aligned} \quad (2)$$

где: C_{g1} и C_{g2} - концентрация радионуклида в первом и втором обменных фондах гидробионта ($C_{g1} + C_{g2} = C_g$. Здесь: C_g - концентрация радионуклида в водорослях); B_1 и B_2 - относительные объемы обменных фондов ($B_1 + B_2 = CF$. Здесь: CF - стационарное значение CF радионуклида водорослями); p_1 и p_2 - константы скорости обмена фондов; P - удельная годовая продукция водорослей. Продуктивность бурых водорослей *Cystoseira crinita* в акватории СБ оценивалась $P = 2$ (1/год) [6].

Экспериментально [2,3] было получено

$$B_1 = 13.6; p_1 = 631.0 \text{ (1/год)}; B_2 = 28.4; p_2 = 28.1 \text{ (1/год)} \quad (3)$$

Смоделированные дифференциальными уравнениями (2) с параметрами (3) и функцией (1) изменения содержания ^{90}Sr в воде СБ показаны сплошной линией на рис.4б.

Удовлетворительность совпадения мониторинговых данных с результатами моделирования свидетельствует об адекватности модели, полученной по результатам экспериментальных работ. Расчетные динамические значения $CF = C_g/C_w$ в момент

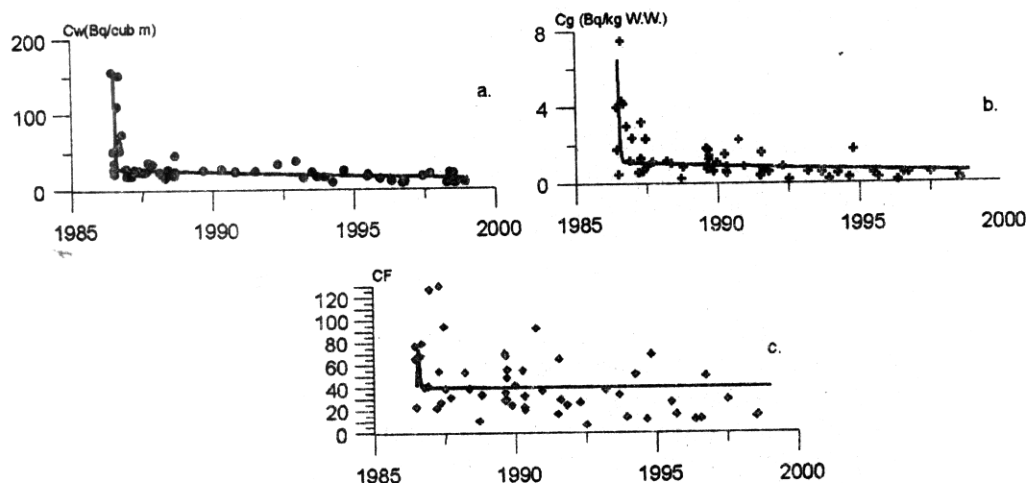


Рис. 4 ^{90}Sr в воде и водоросли *Cystoseira crinita* севастопольских бухт: концентрация ^{90}Sr в воде (а); концентрация ^{90}Sr в водоросли (б); коэффициент накопления ^{90}Sr водорослью
Fig. 4 ^{90}Sr in the Sevastopol bays water and algae, *Cystoseira crinita*: ^{90}Sr concentration in water (а); ^{90}Sr concentration in the algae (б); concentration factor (CF) uptake ^{90}Sr in the algae (с)

времени t , показаны сплошной линией на рис. 4с. Таким образом, в период быстрой фазы снижения концентрации ^{90}Sr в воде СБ динамический CF превышал стационарное значение 42, что позволяет принять гипотезу о влиянии динамических характеристик концентрирования для частичного объяснения причины снижения CF ^{90}Sr цистозирой (рис.2). Анализ численных экспериментов на модели (2) показал в целом, что с увеличением скорости роста гидробионтов динамические значения CF уменьшаются, а чем большие величины отношения T обмена фондов гидробионта к T снижения концентрации радионуклида в водной среде, тем существеннее динамические значения CF могут превышать его стационарное значение.

Известно [11,13], что в природных наблюдениях идентифицируются, как правило, и фонды обмена радионуклида гидробионтом с более медленным обменом, чем это можно определить в экспериментах. Это связано с тем, что содержание морских организмов в аквариумных экспериментах не воспроизводит как по длительности, так и по физиологическим условиям всего жизненного цикла их популяций. Поэтому невязка (рис.4с), по нашему мнению, обусловлена тем, что в наших экспериментах не могли быть идентифицированы наименее медленные фонды обмена ^{90}Sr цистозирой. По-видимому, влияние этих фондов, определивших увеличение соотношения T их обмена к T уменьшения концентрации радионуклида в воде, полностью объясняет приведенные на рис.2 и 3 тенденции снижения CF ^{90}Sr и ^{137}Cs во времени.

Выводы. 1. Тенденции изменения концентрации ^{90}Sr в воде севастопольских бухт определяются локальными факторами и отличаются от особенностей изменения концентрации этого радионуклида в поверхностных слоях Черного моря. С 1987 г отмечается закономерность экспоненциального снижения концентрации ^{90}Sr в воде бухт с постоянной времени 6,9 лет, в бурых водорослях и моллюсках - соответственно 4.0 и 6.7 лет. 2. Закономерности изменения концентрации ^{137}Cs в воде севастопольских бухт идентичны таковым в слое 0-50 м открытой части Черного моря. Начиная с 1987 г, отмечается снижение концентрации радиоцезия в воде бухт с постоянной времени 5.9 лет, в бурых водорослях и моллюсках - 4.4 и 4.3 года. 3. Тенденция снижения коэффициентов накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs водорослями и моллюсками севастопольских бухт обусловлена соизмеримостью постоянных времени их круговорота в обменных фондах морских организмов с постоянными времени снижения концентрации этих радионуклидов в водной среде. 4. Прогнозные оценки радиоактивного загрязнения

гидробионтов могут рассчитываться с учетом коэффициентов накопления, определенных по результатам природных или экспериментальных наблюдений. При соизмеримости постоянных времени круговорота радионуклидов в обменных фондах морских организмов с постоянными времени изменения концентрации радионуклидов в водной среде динамические значения коэффициентов накопления могут на десятки процентов превышать стационарные уровни концентрирования радионуклидов гидробионтами, что необходимо учитывать при использовании биоиндикаторов в мониторинге радиоактивного загрязнения морской среды.

1. Вакуловский С.М., Катрич В.М., Краснопецев Ю.В. и др. Пространственное распределение и баланс ^3H и ^{137}Cs в Черном море в 1977 г. // Атомная энергия. - 1980. - 49, вып. 2. - С. 105 - 108.
2. Егоров В.Н., Демина Н.В., Кулебакина Л.Г. Математическое описание кинетики обмена элементов - химических аналогов морскими макрофитами. // Известия Академии Наук СССР. Серия Биологическая. - М.: АН СССР, 1989. - N 1. - С. 79 - 88.
3. Егоров В.Н., Кулебакина Л.Г. Математическая модель обмена ^{90}Sr между цистозирой и морской водой // Радиоэкология водных организмов. - Рига: Зинатне, 1973. - 2. - С. 305.
4. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г. и др. Модель крупномасштабного загрязнения Черного моря долгоживущими радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr в результате аварии на Чернобыльской АЭС // Водные ресурсы. - 1993. - 20, N 3. - С. 326 - 330.
5. Иванова Л.М. Метод одновременного определения стронция-90, цезия-137, церия-144 в морской воде. - Радиохимия, 1967. - 9, N 5. - С. 622 - 633.
6. Калугина-Гутник А.А. Фитобентос Черного моря. - Киев: Наук. Думка, 1975. - 245 с.
7. Никитин А.И., Мединец В.И., Чумичев В.Б. и др. Радиоактивное загрязнение Черного моря вследствие аварии на ЧАЭС по состоянию на октябрь 1986 года. // Атомная энергия. - 1988. - 65, вып.2. - С. 134 - 137.
8. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. - М.: Атомиздат, 1964. - 295с.
9. Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н. Морская Динамическая Радиохемозкология. - М., 1986. - 177 с.
10. Egorov V.N., Povinec P.P., Polikarpov G.G. et al. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications. // J. Environmental Radioactivity. - 1999. - 43. - P.137 - 155.
11. Germain P., Baron Y., Masson M. et al. Repartition de deux traceurs radioactifs (^{106}Ru -Rh, ^{60}Co) chez deux especes indicatrices (*Fucus serratus* L., *Mytilus edulis* L.) le long du littoral francais de la Manche // Radionuclides: a tool for Oceanography. - Elsevier Applied Sciences, 1988. - P. 312-320.
12. Harvey B.K., Ibbett R.D., Lovett M.B. et al. Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials // Aquatic Env., Prot.: Analytical Methods. - Lowestoft, 1989 - 33 p.
13. Le Fur J. Modelisation numerique des transferts de radioelements artificiels en mer de Manche (processus hydrodynamiques, biologiques et sedimentaires) // Rep. CEA-R-5221. - 1990. - 205 p.
14. Miller R., Drissner J., Kamert S. et al. Control and management of semi-natural ecosystems contaminated by caesium radionuclides from the Chernobyl fallout // Mat. Intern. Conf. MESAER, Saloniki, Greece, 18-25 June, 1999 (in press)

Институт биологии южных морей НАНУ,
г. Севастополь

Получено 29.12.99

V.N. EGOROV, G.G. POLIKARPOV, N.Y. MIRZOYEVA, L.G. KULEBAKINA, Yu.G. ARTYOMOV

THE TENDENCIES OF CHANGE OF THE ^{90}Sr AND ^{137}Cs CONCENTRATION IN THE WATER AND HYDROBIONTS OF THE SEVASTOPOL BAYS AFTER CHERNOBYL NPP ACCIDENT

Summary

The regularity of change of the ^{90}Sr and ^{137}Cs concentration in water and hydrobionts of the Sevastopol bays from 1986 till 1999 years, after Chernobyl NPP accident, are described. This is established, that the concentration of ^{90}Sr in water is moderated exponentially, where 6.9 years are constant of time, in algae these are 4.0 years and in mussels — 6.7 years, for ^{137}Cs — 5.9, 4.4 and 4.3 accordingly. The phenomenon of decrease of the coefficients of ^{90}Sr and ^{137}Cs accumulation by hydrobionts in time is determined. It is shown with the help of a mathematical model, that this phenomenon is caused by effect of dynamic responses of the radionuclides concentrating by marine organisms.