

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

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ОТКЛИК ЧЕРНОГО МОРЯ
НА ЧЕРНОБЫЛЬСКУЮ ЯДЕРНУЮ АВАРИЮ
В ОТНОШЕНИИ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ^{90}Sr И ^{137}Cs**

© **В. Н. Егоров¹, Г. Г. Поликарпов¹, И. Освас², Н. А. Стокозов¹,
С. Б. Гулин¹, Н. Ю. Мирзоева¹, 2002**

¹Институт биологии южных морей им. А. О. Ковалевского Национальной Академии наук Украины,
Севастополь, Украина

²Морская Лаборатория Окружающей Среды Международного Агентства по Атомной Энергии (MEL),
Монако

Поступила 30 июня 2002 г.

Исследованы потоки поступления ^{90}Sr и ^{137}Cs в Черное море после аварии на Чернобыльской АЭС, их миграции между компонентами экосистем, выполнены расчеты дозовых нагрузок на морские организмы за послеварийный период, а также оценка и прогноз времени пребывания этих радионуклидов в водной среде. Получено, что время поступления ^{137}Cs в Черное море превысит 35 лет, а количество ^{137}Cs составит 1740 – 2440 ТБк, или 1.7 – 6.6 % от практически полного его поступления в окружающую среду из аварийного реактора ЧАЭС. Прогнозируемое поступление ^{90}Sr в Черное море будет продолжаться свыше 70 лет, его количество за этот период составит 305 – 505 ТБк, или 3.7 – 38.8 % от его общего количества, инжектированного в окружающую среду после аварии на ЧАЭС. Вынос ^{137}Cs чернобыльского происхождения из Черного моря через пролив Босфор будет продолжаться более 30 лет, ^{90}Sr – около 50. Дозовые нагрузки черноморских организмов соответствовали уровням в пределах «Зоны физиологической маскировки» и «Зоны радиационного благополучия».

Ключевые слова: Черное море, радиоэкология, радионуклиды, миграция, потоки, дозовые нагрузки, прогноз.

This work is dedicated to the investigation of ^{90}Sr and ^{137}Cs fluxes of discharges to the Black Sea after Chernobyl NPP accident, migration of the radionuclides in the water environment, accumulation by hydrobionts and the dose commitment assessment for marine organisms as well as the prediction of the ^{90}Sr and ^{137}Cs time-scales of contents decrease in the different components of the Black Sea ecosystem to the pre-Chernobyl NPP accident levels. It was obtained, that ^{137}Cs discharge to the Black Sea will exceed 35 years and will be 1740 – 2440 TBq or 1.7–6.6% from practically full amount injected into to the environment from the Chernobyl NPP accident reactor. The prognosis ^{90}Sr discharge to the Black Sea will exceed 70 years and will be 305 - 505 TBq for this period or 3.7 - 38.8 % from its quantity injected into the environment after the Chernobyl NPP accident. The ^{137}Cs discharge via Bosphorus from the Black Sea will exceed 30 years, ^{90}Sr – about 50 years. The radioactive contamination of the Black Sea hydrobionts after the Chernobyl NPP accident was not exceed maximum permissible levels of concentrations, their

total dose commitments were in the “Physiological masking zone” and “Radiation well-being zone” limits.

Key words: the Black Sea, radioecology, radionuclides, migration, outflow, dose commitments, prediction.

По современным оценкам с 26 апреля 1986 г. после ядерной аварии на Чернобыльской атомной электростанции в окружающую среду поступило 1.3 – 8.1 ПБк ^{90}Sr и 37.0 – 100.0 ПБк ^{137}Cs [4, 13]. В результате акватория Черного моря подверглась острому радиоактивному загрязнению из атмосферных выпадений и хроническому загрязнению со стоком рек. Впоследствии ^{90}Sr и ^{137}Cs стали распространяться по акватории моря и между компонентами его экосистем в результате комплексного влияния физических и биогеохимических процессов. При этом они, с одной стороны, как источники ионизирующих излучений стали оказывать радиационное воздействие на гидробионты, а с другой – явились меткой интенсивности биогеохимических процессов в Черном море, ответственных за самоочищение вод и депонирование радионуклидов в составе донных отложений. Изучение отклика Черного моря на радиоактивное загрязнение после аварии на ЧАЭС позволяет оценить как интегральное радиационное воздействие на морские организмы, так и получить характеристики самоочищения моря.

Материал и методы. Материалы наблюдений получены в 1986 – 2000 гг. на научно-исследовательских судах ИнБЮМ совместно с учеными Океанографического института в Вудсхолле (WHOI) и Агентства по защите окружающей среды (США), а также по меж-

дународным проектам ЕС (EROS-2000 и EROS-21) и МАГАТЭ (NR 7400 RB и RER/2/003). Калибровка результатов измерений выполнена совместно с WHOI, Risoe National Laboratory (Дания) и под эгидой MEL (МАГАТЭ) с профильными лабораториями причерноморских стран. Потоки загрязнения Черного моря ^{90}Sr и ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС были оценены в результате наших наблюдений [2, 9 – 12, 15 - 17], а также опубликованных данных [6, 7, 19, 20 – 22]. Тенденции изменения концентрационных характеристик гидробионтов в отношении ^{90}Sr и ^{137}Cs анализировались по данным радиоэкологического мониторинга севастопольских бухт [3]. При получении прогнозных оценок использовались данные аппроксимации тенденций изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной среде и в компонентах экосистем экспоненциальными функциями [13], также результаты численных экспериментов на модели крупномасштабного водного, солевого и радиоизотопного баланса Черного моря [2].

Результаты. Как известно, непосредственно после аварии на ЧАЭС Черное море подверглось атмосферным выпадениям ^{90}Sr и ^{137}Cs . В дальнейшем до 1994 г. отмечалось значимое радиоактивное загрязнение ^{90}Sr со стоком р. Днепр [12]. В первые месяцы после аварии наблюдалась высокая вариабельность распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностных

слоях моря [5, 8], которая в дальнейшем уменьшилась в результате перемешивания вод. Профили вертикального распределения ^{90}Sr и ^{137}Cs в халистатической зоне Черного моря, показанные на рис. 1 и 2, свидетельствуют, что после аварии на ЧАЭС снижение концентрации этих радионуклидов в поверхностных слоях моря определялось перемешиванием вод в пределах слоя 0 - 50 м и миграцией ^{90}Sr и ^{137}Cs в глубинные слои. Иными словами, главным фактором снижения радиоактивного загрязнения вод Черного моря непосредственно после его загрязнения из атмосферных выпадений явилась разбавительная емкость поверхностных вод в отношении радионуклидов. В целом, концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностных водах моря после аварии на ЧАЭС снижалась экспоненциально (рис. 3). Концентрация ^{90}Sr достигла уровня, предшествующего аварии, в 1995 г. По нашим оценкам, содержание ^{137}Cs достигнет дочернобыльского уровня к 2003 г.

Результаты радиоэкологического мониторинга севастопольских бухт (рис. 4, 5) показывают, что в мае 1986 г. максимальные концентрации ^{137}Cs в воде прибрежной зоны достигали $815 \text{ мБк} \cdot \text{л}^{-1}$, а ^{90}Sr - $157 \text{ мБк} \cdot \text{л}^{-1}$, превышая соответственно в 100 и 10 раз дочернобыльский уровень концентрации этих радионуклидов [5]. В течение года произошло достаточно быстрое снижение концентрации ^{137}Cs в воде, по-видимому, обусловленное как разбавительной способностью вод бухты, так и их обменом с внешним рейдом. В то же вре-

мя, концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в водорослях и моллюсках после аварии на ЧАЭС в 1986 г. повысилась скачкообразно. В дальнейшем отмечалось экспоненциальное снижение радиоактивного загрязнения гидробионтов. Следует отметить, что наблюдались также тенденции снижения коэффициентов накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs водорослями и моллюсками (рис. 4 d, e; рис. 5 d, e), которые были обусловлены динамическими закономерностями концентрирования радионуклидов гидробионтами в условиях соизмеримости постоянных времени изменения концентрации радионуклидов в воде и постоянных времени радиоизотопного обмена морских организмов [3].

Результаты экспоненциальной аппроксимации данных по изменению концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в компонентах экосистемы Черного моря (табл. 1) показали, что масштаб времени отклика экосистемы моря на аварию на ЧАЭС по ^{90}Sr составил 21 - 73 года, а по ^{137}Cs - 11 - 77 лет. Эти данные свидетельствуют о том, что в результате биогеохимических процессов время пребывания (residence time) ^{90}Sr и ^{137}Cs в Черном море не превышает 50 % от времени существования атомов этих радионуклидов, составляющего около 150 лет [1].

Оценки баланса радиоактивного загрязнения Черного моря показаны в табл. 2. Хорошо видно, что вынос ^{90}Sr и ^{137}Cs через пролив Босфор является значимым фактором самоочищения Черного моря. Следует отметить, что значимым фактором является также депонирование ^{137}Cs в составе донных

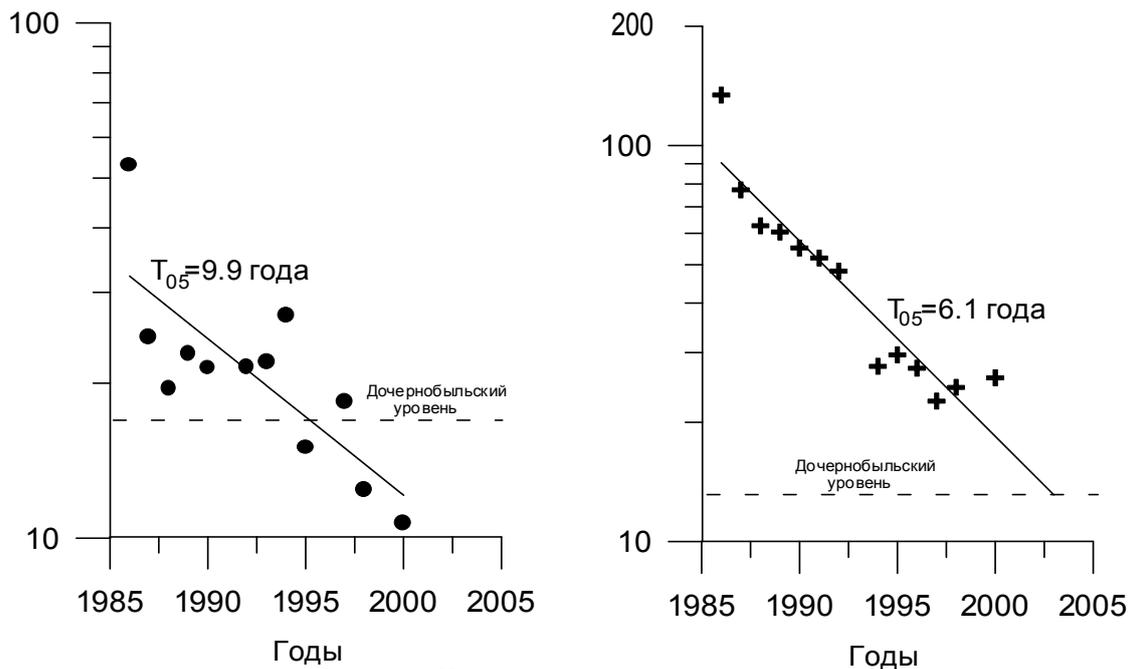


Рис. 3. Изменение концентрации ^{90}Sr (●) и ^{137}Cs (+) в слое 0 - 50 м в центре Западного циклонического круговорота Черного моря
 Fig.3. Change of ^{90}Sr (●) and ^{137}Cs (+) concentration in 0 - 50 m layer in the Western Black Sea Central Basin

отложений (табл. 3), особенно интенсивное в эстуариях рек.

Максимальные уровни радиоактивного загрязнения экосистемы Черного моря регистрировались в 1986 - 1992 гг. (табл. 4). Наши исследования (табл. 5) показали, что дозовые нагрузки, полученные морскими организмами после аварии на ЧАЭС, не превышали уровней, соответствующих зоне физиологической маскировки и зоне радиационного благополучия [18], причем от 14 до 90 % дозовых нагрузок морских организмов получены в 1986 - 1987 гг.

Обсуждение и выводы. Проведенные исследования показали поэтапную реакцию экосистемы Черного моря на Чернобыльскую аварию: скачкообразное увеличение

содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной среде в первый послеаварийный год; последующее резкое (в масштабе 1 - 2 лет) снижение их концентрации в воде за счет разбавительной способности слоя 0 - 50 м моря; дальнейшее экспоненциальное уменьшение количества этих радионуклидов в различных участках акватории моря с постоянными времени от 6 до 10 лет.

Реакция гидробионтов проявилась в отслеживании тенденций изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде с учетом концентрирующей функции морских организмов и запаздыванием в отслеживании этих тенденций за счет проявления инерционных характеристик концентрирования радионуклидов при протекании сорбционных и метаболических процессов.

Таблица 5. Дозовые нагрузки, получаемые различными видами гидробионтов Черного моря от измерений радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs после аварии на ЧАЭС (1986 -2000 гг.)

Table 5. Dose commitments for different species Black Sea hydrobionts from ^{90}Sr and ^{137}Cs radionuclides after Chernobyl NPP accident (1986 - 2000)

Объект исследования	^{90}Sr (Гр · год ⁻¹ для растений; Зв · год ⁻¹ для моллюсков и рыб) $\times 10^{-4}$		^{137}Cs (Гр · год ⁻¹ для растений; Зв · год ⁻¹ для моллюсков и рыб) $\times 10^{-4}$	
	1986 – 2000 гг.	1986 – 1987 гг. (%)	1986 – 2000 гг.	1986 – 1987 гг. (%)
Водоросли:				
<i>C. crinita</i>	33.86	47.12	146.01	40.13
<i>Ulva rigida</i>	6.52	21.38	70.36	14.34
Моллюски:				
<i>M. galloprovincialis</i>	109.57	14.23	39.98	29.61
Рыбы:				
<i>O. merlangus euxinus</i>	3.72	14.25	6.139	31.34
<i>Scophthalmus maeoticus</i>	10.73	69.90	9.354	42.23
<i>S. porcus</i>	4.45	54.21	26.616	90.44
<i>C. tinca</i>	6.63	21.57	5.679	59.29

Прогнозируемое поступление ^{90}Sr в Черное море будет продолжаться свыше 70 лет и составит 305 – 505 ТБк, или 3.7 – 38.8 % от его количества, инжектированного в окружающую среду после аварии на ЧАЭС. Причем 37.8 – 59.4 % от прогнозируемого потока загрязнения моря составили атмосферные выпадения ^{90}Sr в мае 1986 г., повысившие пул его содержания в полном объеме моря на 6.7 – 20.0 %.

Поступление ^{137}Cs в Черное море превысит 35 лет и составит 1740 – 2440 ТБк, или 1.7 – 6.6 % от полного потока его поступления в окружающую среду из аварийного реактора ЧАЭС. Атмосферные выпадения ^{137}Cs в мае 1986 г. составили 97.7 – 98.3 % от полного потока загрязнения моря. В результате атмосферных выпадений содержание ^{137}Cs в водах Черного моря возросло в 1.2 – 1.7 раза.

Вынос ^{90}Sr чернобыльского происхождения из Черного моря через пролив Босфор

превысит 47 лет и составит 167.6 ТБк, или 33.1 - 54.9 % от полного потока загрязнения моря после аварии. ^{137}Cs чернобыльского происхождения будет выноситься из Черного моря свыше 32 лет. Практически полный поток выноса ^{137}Cs через пролив Босфор составит 311.1 ТБк, или 12.7 – 17.9 % от количества ^{137}Cs , поступившего в море после аварии.

Коэффициенты накопления ^{90}Sr морскими организмами лежат в пределах $2.5 \cdot 10^1$ – $6.3 \cdot 10^2$, а ^{137}Cs $2.0 \cdot 10^1$ – $4.2 \cdot 10^2$ единиц. Дозовые нагрузки черноморских организмов после аварии на ЧАЭС соответствовали уровням в пределах зоны физиологической маскировки и зоны радиационного благополучия.

Получено, что в результате биогеохимических процессов период пребывания атомов ^{90}Sr и ^{137}Cs в водной среде Черного моря не превышает 50 % от среднего времени их существования.

1. *Воккен Г. Г.* Радиобиология. – Москва: Высшая школа, 1967. – 232 с.
2. *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**, вып.3. - С. 326 - 330.
3. *Егоров В. Н., Поликарпов Г. Г., Мирзоева Н. Ю.* и др. Тенденции изменения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и гидробионтах севастопольских бухт после аварии на ЧАЭС // Экология моря. – 2000. - Вып. 50. – С. 83 - 88.
4. *Ильин Л. А., Павловский О. А.* Радиоэкологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС и меры, предпринятые с целью их смягчения // Атомная энергия.-1988.- **65**, вып.2. - С.119-129.
5. Молисмология Черного моря / Поликарпов Г. Г., Миронов О. Г., Егоров В. Н. и др. - Киев: Наук. думка, 1992. – 303 с.
6. *Никитин А. И., Мединец В. И., Чумичев В. Б.* и др. Радиоактивное загрязнение Черного моря вследствие аварии на ЧАЭС по состоянию на октябрь 1986 г. // Атомная энергия. – 1988. – **65**, вып.2. – С. 134 – 137.
7. *Buesseler K. O., Livingston H. D., Casso S. A.* Mixing between oxic and anoxic waters of the Black Sea as traced by Chernobyl cesium isotopes // Deep-Sea Research. - 1991. – **38**, № 2. – P. 725 - 745.
8. *Chudinovskya T. V., Ereemeev V. N.* Radioactive contamination of the Black Sea Waters // Practical ecology of the marine regions. Black Sea - Kiev, 1990 - P. 46-56.
9. *Egorov V. N., Polikarpov G. G., Kulebakina L. G.* et al. Modelling Large-scale Contamination of the Black Sea Caused by Long-lived Radionuclides of ^{137}Cs and ^{90}Sr Following the Chernobyl Accident // Symp. Comperative Assessment of the Environmental Impact of radionuclides Released During Three Major Nuclear Accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl. Luxembourg, Oct. 1 –5, 1990: Report EUR 13574. – Luxembourg, 1991 – P. 649-664.
10. *Egorov V. N., Polikarpov G. G., Kulebakina L. G.* et al. Present and projected radioactive contamination of the Black Sea from the Chernobyl reactor accident // Proceedings of symposium on Environmental Contamination in Central and Eastern Europe, Budapest, Oct. 12-16, 1992: Abstr. – Budapest, 1992 – P. 353 – 355.
11. *Egorov V. N., Polikarpov G. G., Stokozov N. A.* et al. Some data on the fate of ^{90}Sr in the aquatic system, including the region Chernobyl NPP accident, the Black Sea and the Aegean Sea // European Commission Radiation Protecricion № 70: The radiological exposure of the population of the European Community to radioactivity in the Mediterranean Sea. MARINE-MED Project, Rome, May 17-19, 1994: Directorate-General, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, - Brussels-Luxembourg, 1995 – P. 557 - 583.
12. *Egorov V. N., Povinec P. P., Polikarpov G. G.* et al. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the NPP Chernobyl Accident: Inventories, Balance and Tracer Applications // J. Environ Radioactivity. - 1999. – **43**. – P. 137 - 155.
13. *Egorov V. N., Polikarpov G. G., Stokozov N. A.* et al. Assessment of the Black Sea response time-scale to pollution with ^{90}Sr and ^{137}Cs following the Chernobyl NPP accident // Rapport du 36e Congres de la CIESM: 36th CIESM Congress Proceedings, - Monte-Carlo (Monaco). - 2001. - **36**. - P. 121.
14. *Gudiksen P. H., Harvey T. F., Lange R.* Chernobyl Source Term Estimation // Proc. of Seminar on Comperative Assessment of the Environmental Impact of Radionuclides Released during three major nuclear accidents: Kyshtym, Windscale, Chernobyl, Luxembourg, Oct. 1-5, 1990: Report EUR 13574. – Luxembourg, 1991. - 1. - P.93-112.
15. *Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N.* et al. Chronological study of ^{137}Cs , PCBs and some pesticides fluxes into the western Black Sea deep sediments // European Commission Radiation Protecricion № 70: The radiological exposure of the population of the European Community to radioactivity in the Mediterranean Sea. MARINE-MED Project, Rome, May 17-19, 1994: Directorate-General, Environment, Nuclear Safety and Civil Protection, - Brussels-Luxembourg, 1995 – P. 487 - 500.
16. *Gulin S. B., Aarkrog A., Polikarpov G. G.* et al. Chronological Study of ^{137}Cs Input to the Black

- Sea Deep and Shelf Sediments // Radioprotection – Colloques. – 1997. - **32**, C2. – P. 257 -262.
17. *Polikarpov G. G., Livingston H. D., Kulebakina L. G.* et al. Inflow of Chernobyl ⁹⁰Sr to the Black Sea from Dnieper River // *J. Estuarine, Coastal and Shelf Science.* – 1992. – **34**. – P. 315 - 320.
 18. *Polikarpov G. G.* Conceptual model of responses of organisms, populations and ecosystems to all possible dose rates of ionizing radiation in the environment // *Radiation Protection Dosimetry.* – 1998. – **75**, No 1-4. – P. 181 – 185.
 19. *Vakulovsky S. M., Voitsekhovich O. V.* Radioactive contamination of water bodies on contaminated area after the Chernobyl NPP accident // *Proceedings of IAEA Symposium, Vienna, Oct. 16-20, 1989: Abstr.* – Vienna IAEA, 1991.
 20. *Vakulovsky S. M., Nikitin A. I., Chumichev V. B.* et al. Cesium-137 and Strontium-90 contamination of water bodies in the areas affected by releases from the Chernobyl Nuclear Power Plant accident // *J. Environ. Radioactivity.* – 1994. – 23. – P. 103 - 122.
 21. *Voitsekhovich O. V.* Progress Report // 2nd Research Co-ordination Meeting of the IAEA Co-ordination Research Programme for “Application of Tracer Techniques to Studies of Processes and Pollution in the Black Sea”, Oct. 14-18, 1995. – Monaco, 1996.
 22. *Voitsekhovich O. V.* Project status report of the Ukrainian Hydrometeorological Research Institute // 3rd Co-ordination Meeting of IAEA’s Technical Co-ordination Project RER/2/003 “Marine Environmental Assessment in the Black Sea Region”, Vienna, Jan. 29-30, 1998: Working Material. - Vienna IAEA, 1998.

Таблица 1. Период полууменьшения ($T_{0.5}$) и полный временной отклик ($T=5 T_{0.5}$) основных балансовых компонентов и некоторых экосистем Черного моря на загрязнение ^{90}Sr и ^{137}Cs после аварии на Чернобыльской АЭС (в годах)

Table 1. Half-lives ($T_{0.5}$) and complete times of response ($T=5 T_{0.5}$) for main balance components and some ecosystems of the Black Sea Basin to the pollution with ^{90}Sr and ^{137}Cs after Chernobyl NPP accident (years)

Компоненты	^{90}Sr		^{137}Cs	
	$T_{0.5}$	T	$T_{0.5}$	T
Поступление с водами реки Днепр (с 1987 г.)	7.0	36.0	2.0	11.0
Поступление с водами реки Дунай (с 1987 г.)	14.4	73.0	6.9	35.5
Вынос из Черного моря через пролив Босфор (с 1987 г.)	9.5	47.5	6.4	32
Поверхностная вода эстуарной зоны Днепра (с 1989 г.)	9.6	52.0	-	-
Поверхностная вода, Западный район Черного моря (с 1986 г.)	9.9	49.5	6.1	30.5
Донные отложения, дельта Дуная (с 1991 г.)	-	-	14.4	77.0
Регион севастопольских бухт:				
Поверхностная вода (с 1987 г.)	6.9	35.5	5.9	30.5
Бурые водоросли, <i>C. crinita</i> (с 1987 г.)	4.0	21.0	4.4	23.0
Моллюски, <i>M. galloprovincialis</i> (с 1986 г.)	6.7	33.5	4.3	21.5
Рыбы, <i>Odontogadus merlangus euxinus</i> (с 1986 г.)	4.7	23.5	-	-

Примечание: Включая период до экспоненциального уменьшения концентрации

Таблица 2. Балансовые компоненты и прогнозные оценки для ^{90}Sr и ^{137}Cs в Черном море

Table 2. Balance components and prognostic estimation for ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea Basin

Компоненты баланса	^{90}Sr (ТБк)			^{137}Cs (ТБк)		
	Поступление/ Вынос Оценки	Прогноз дальнейшего поступления/ выведения	Всего	Поступление/ Вынос Оценки	Прогноз дальнейшего поступления/ выведения	Всего
Запас в общем объеме до 26.04.86 г.	---	---	~1500	---	---	1400+/-300
Атмосферное выпадение в мае 1986 г.	100-300	---		1700-2400	---	
Поступление с рекой Днепр	90.2*	57.8	148.0	2.0*	0.1	2.1
Поступление с рекой Дунай	24.5*	32.8	57.3	24.0*	13.6	37.6
Вынос через пролив Босфор	110.2**	57.4	167.6	250.4**	60.7	311.1

Примечание: * - оценки за период 1986 - 1995 гг.; ** - оценки за период 1986-2000 гг.

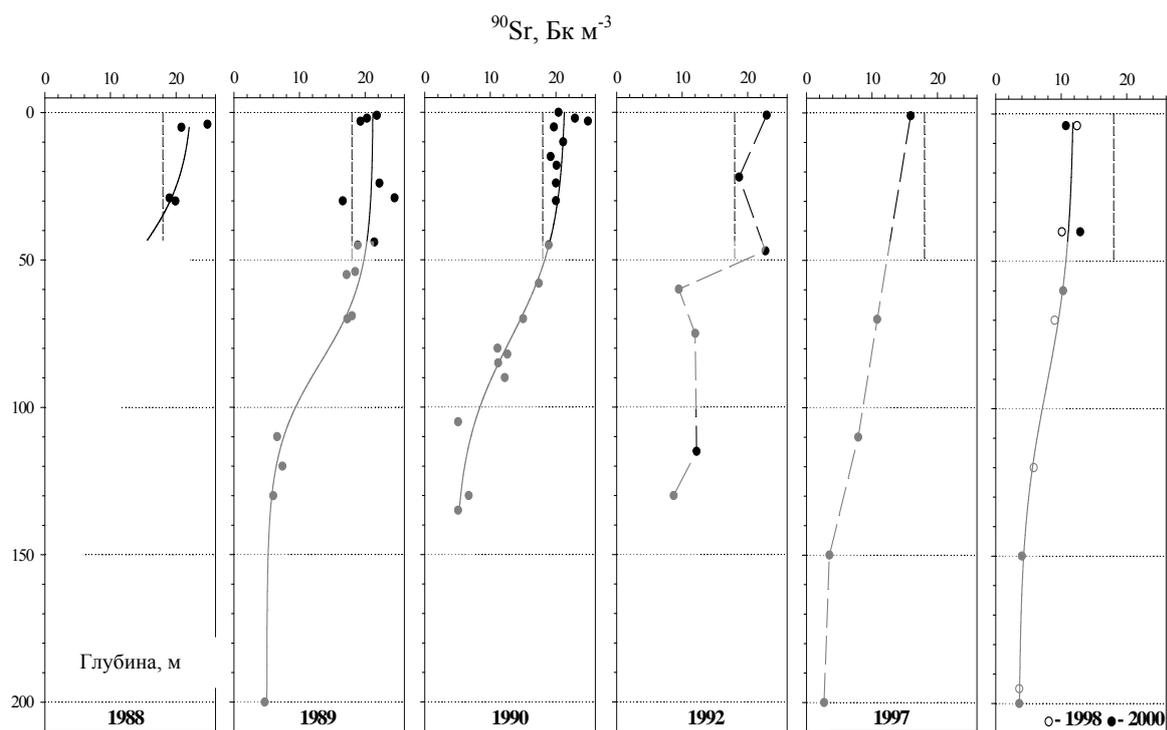


Рис. 1. Вертикальное распределение ^{90}Sr в Западном и Центральном районах Черного моря за период 1988 – 2000 гг. (● и средней длины пунктирная линия), их аппроксимация (сплошная линия) и уровень концентрации ^{90}Sr в 0 - 50 м слое до аварии на Чернобыльской АЭС (короткая пунктирная линия)

Fig. 1. Vertical distribution of the ^{90}Sr in the Western Black Sea Central Basin in 1988 - 2000 (circles and medium dotted line), their approximation (solid line) and level of ^{90}Sr concentration in 0 - 50 m layer before Chernobyl NPP accident (short dashed line)

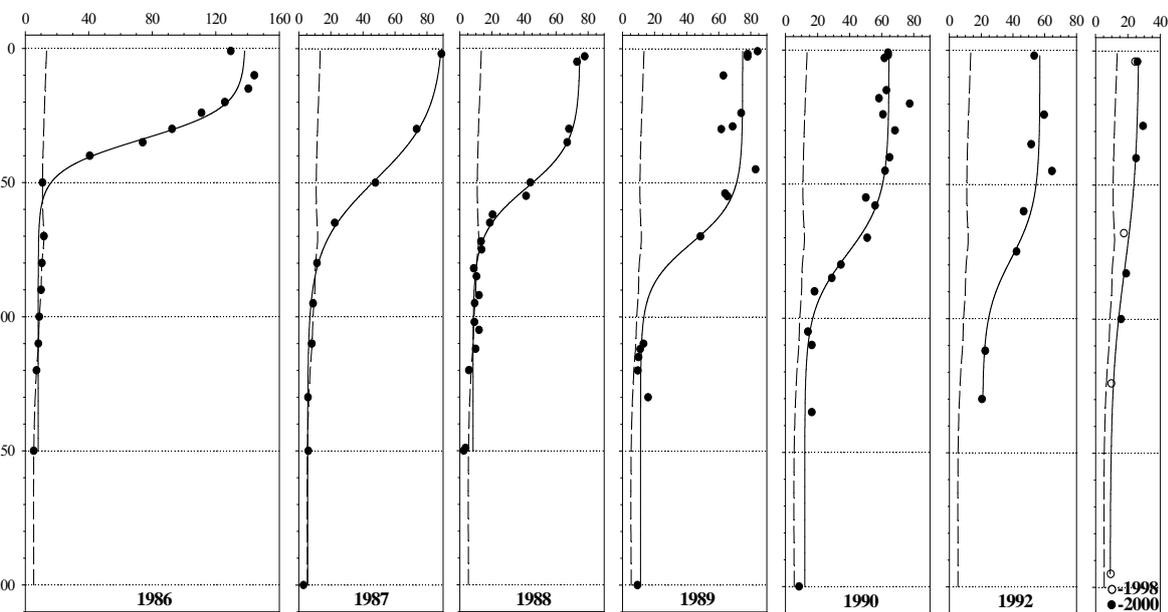


Рис. 2. Вертикальное распределение ^{137}Cs в Западном и Центральном районах Черного моря за период 1988 – 2000 гг. (●), их аппроксимация (сплошная линия) и уровень концентрации ^{137}Cs в 0 - 50 м слое до аварии на Чернобыльской АЭС (пунктирная линия)

Fig. 2. Vertical distribution of the ^{137}Cs in the Western Black Sea Central Basin in 1988 - 2000 (circles), their approximation (solid line) and level of ^{137}Cs concentration in 0 - 50 m layer before Chernobyl NPP accident (dashed line)

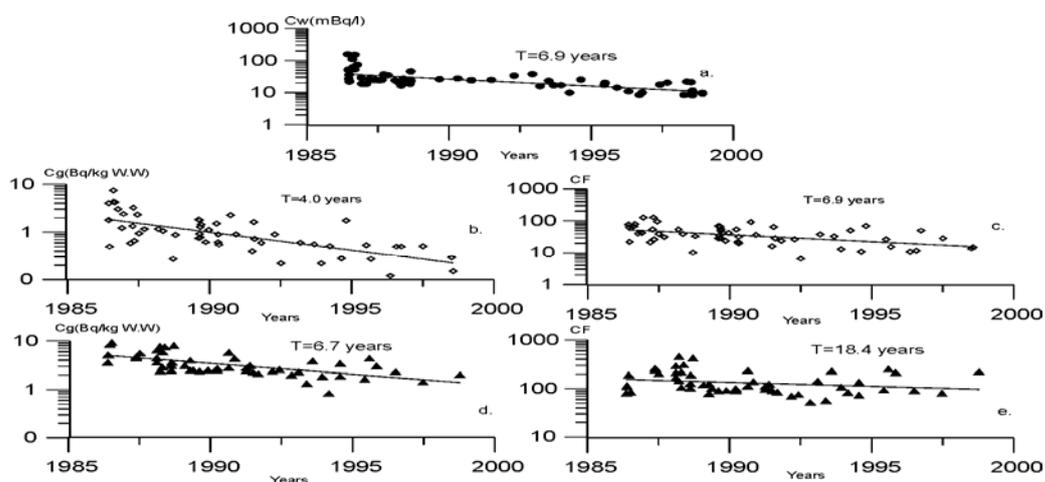


Рис. 4. Динамика системы «Концентрация ^{90}Sr в экосистеме севастопольских бухтах: воде - гидробионтах». Концентрация ^{90}Sr в воде севастопольских бухт (а); концентрация ^{90}Sr и коэффициент накопления в *Cystoseira crinita* (b, c) и *Mytilus galloprovincialis* (d, e).
 Fig. 4. Dynamics of the System: " ^{90}Sr concentration in the Sevastopol Bays water - hydrobionts". ^{90}Sr concentration in water of the Sevastopol Bays (a); ^{90}Sr concentration and concentration factor in *Cystoseira crinita* (b, c) and *Mytilus galloprovincialis* (d, e).

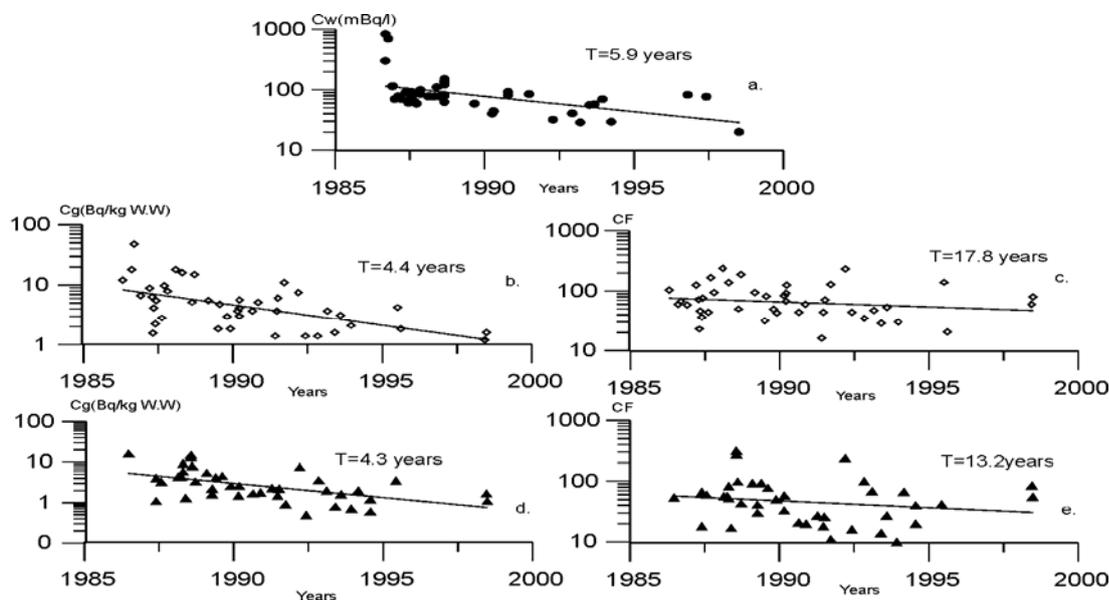


Рис. 5. Динамика системы «Концентрация ^{137}Cs в севастопольских бухтах: воде – гидробионтах». Концентрация ^{137}Cs в воде севастопольских бухт (а); концентрация ^{137}Cs и коэффициент накопления в *C. crinita* (b, c) и *M. galloprovincialis* (d, e).
 Fig. 5. Dynamics of the System: " ^{137}Cs concentration in the Sevastopol Bays water - hydrobionts". ^{137}Cs concentration in water of the Sevastopol Bays (a); ^{137}Cs concentration and concentration factor in *Cystoseira crinita* (b, c) and *Mytilus galloprovincialis* (d, e).

Таблица 3. Данные отбора донных отложений из различных регионов Черного моря

Table 3. Sediment core data from different locations in the Black Sea

Место отбора	Координаты	Глубина дна, м	Влаж- ность *	⁴⁰ K гК кг ⁻¹	¹³⁷ Cs Бк м ⁻²	СУС мм г ⁻¹	ОУН г м ⁻² г ⁻¹
Эстуарная зона Дуная	45°12' N 29°51' E	26	0.68	19.6	12182	11.5	3994
Эстуарная зона Днепра	46°33' N 31°25' E	13	0.67	15.7	4456	9.2	3670
Северо-западный край шельфа	44°42' N 31°37' E	172	0.74	9.5	287	-	-
Северо-западный склон	44°39' N 31°46' E	607	0.82	8.5	195	2.2	138
Абиссаль Черного моря	43°26' N 32°09' E	1983	0.80	4.2	180	0.4	70
Севастопольские бухты	44°37' N 33°32' E	15	60.1	-	3450	2.4	607
Эстуарная зона реки Чорох (юго-восток Черного моря)	41°40' N 41°33' E	70	46.9	21.0	10978	5.3	3071

*Средняя влажность верхнего 10-см слоя донных отложений; СУС – средний уровень седиментации, рассчитанный для глубин пиков определения ¹³⁷Cs чернобыльского и бомбового происхождения; ОУН – общий уровень накопления; 1 гК = 30.65 Бк ⁴⁰K

Таблица 4. Максимальные концентрации ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs и их коэффициенты накопления (КН) в компонентах экосистем севастопольской бухты

Table 4. Maximum levels of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs concentrations in the components of the Sevastopol Bay ecosystems

Объекты исследования	⁹⁰ Sr (мБк л ⁻¹ ; Бк кг ⁻¹ сырого веса)			¹³⁷ Cs (мБк л ⁻¹ ; Бк кг ⁻¹ сырого веса)		
	Максимальные концентрации (С)		КН (пределы измене- ния)	Максимальные концентрации (С)		КН (пределы измене- ния)
	Дата отбора	С		Дата отбора	С	
Морская вода	07.05.1986	156	-	10.09.1986	703	-
Водоросли:						
<i>C. crinita</i>	15.07.1986	4.3	22 - 130	10.09.1986	48	22 - 418
<i>Ulva rigida</i>	20.05.1986	0.5	3.8 - 18	12.07.1988	5.5	9.4 - 70
<i>Enteromorpha linza</i>	23.08.1990	10.8	442	28.06.1986	10.3	5.1 - 96
Моллюски:						
<i>M. galloprovincialis</i>	27.02.1990	60	55 - 633	10.08.1988	9.2	17 - 237
Крабы:						
<i>Carcinus maenus</i>	28.11.1986	7.5	73 - 400	26.10.1986	30	19 - 263
Рыбы:						
<i>O. merlangus euxinus</i>	22.05.1992	0.54	6 - 37.3	22.05.1992	4.7	6.9 - 123
<i>Mugil cephalus</i>	14.02.1987	0.8	13 - 42	14.02.1987	7.4	11 - 105
<i>Trachurus mediterraneus ponticus</i>	03.05.1989	1.4	7.4 - 66	24.10.1986	30	32 - 258
<i>Crenilabrus tinca</i>	13.06.1988	0.7	2.5 - 39	13.06.1988	4.1	7.7 - 52
<i>Sprattus sprattus phalericus*</i>	15.08.1989	0.3	5 - 12	24.04.1988	4.4	14 - 80
<i>Scorpaena porcus</i>	11.07.1986	1.3	5.2 - 11	24.10.1986	18.5	2 - 161

* - Пробы отобраны из 10-мильной зоны Севастополя