



УДК 539.16:551.46:551.464.3.(262.5)

**С. Б. Гулин, Н. Ю. Мирзоева, академик НАН Украины В. Н. Егоров,
И. Г. Сидоров, В. Ю. Проскурнин, Л. В. Гулина**

Вторичное загрязнение Черного моря техногенными радионуклидами после аварии на Чернобыльской АЭС

На основе данных радиоэкологического мониторинга и ядерно-геохронологической реконструкции прослежена динамика радиоактивного загрязнения Черного моря за период 1986–2013 гг. с учетом вклада вторичных источников чернобыльских радионуклидов, к которым относится их поступление из водосборных бассейнов и ремобилизация из донных отложений. Установлено, что совокупность этих процессов, а также вариабельность речного стока, значительно усилившегося в 1995–1999 гг., могли стать основными причинами отмеченного в конце 1990 – начале 2000-х гг. увеличения содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде, донных осадках и гидробионтах Черного моря. Полученные данные позволили существенно уточнить прогноз периода времени, когда радиоактивное загрязнение Черного моря достигнет доаварийного уровня.

Черное море является одним из самых загрязненных техногенными радионуклидами бассейнов Мирового океана [1–3]. Оно занимает второе место после Ирландского моря по содержанию ^{90}Sr и третье — по загрязнению ^{137}Cs , уступая только Ирландскому и Балтийскому морям [2–4]. Основными источниками поступления антропогенных радионуклидов в Черное море были атмосферные выпадения после испытаний ядерного оружия в 1950–60-е гг., а также в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Вместе с тем Черное море обладает обширными водосборными территориями, суммарная площадь которых более чем в 5 раз превышает площадь поверхности моря, поэтому поступление речных вод стало важнейшим фактором вторичного радиоактивного загрязнения черноморского бассейна в 1960–80-е гг. и после аварии на ЧАЭС [4, 5–7].

Установлено, например, что суммарное количество ^{90}Sr , поступившее в Черное море с речным стоком в 1986–1994 гг., практически сравнялось с его атмосферными выпадениями после аварии на ЧАЭС [1, 2, 6]. Роль вторичного радиоактивного загрязнения Черного моря после 2000 г. практически не оценивалась [2, 7], хотя результаты предшествующих исследований давали основание предполагать, что речной сток техногенных радионуклидов в черноморский бассейн достигнет доаварийного уровня только к 2020–2025 гг. [2]. В связи с этим, целью данной работы была оценка динамики радиоактивного загрязнения Черно-

© С. Б. Гулин, Н. Ю. Мирзоева, В. Н. Егоров, И. Г. Сидоров, В. Ю. Проскурнин, Л. В. Гулина, 2013

го моря за последние десятилетия с учетом вклада вторичных источников поступления черновбыльских радионуклидов.

Исследования были выполнены на основе данных радиоэкологического мониторинга Черного моря, который проводился в Отделе радиационной и химической биологии Института биологии южных морей НАН Украины (ОРХБ ИнБЮМ НАН Украины, Севастополь) в течение всего периода после аварии на ЧАЭС [1, 2]. Кроме того, была применена методология ядерно-геохронологической реконструкции поступления радионуклидов в донные осадки Черного моря за более длительный период, разработанная в ОРХБ ИнБЮМ НАН Украины [8, 9].

Результаты определения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в поверхностном слое воды Черного моря, полученные сотрудниками ОРХБ ИнБЮМ НАН Украины в 2011–2013 гг, демонстрирует табл. 1. Из данных таблицы следует, что уровни содержания радионуклидов в Черном море все еще относительно высоки и в ряде случаев превышают значения, зарегистрированные в дочернобыльский период, когда они составляли в среднем около $16 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{137}Cs и $22 \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{90}Sr [10]. При этом наибольшая концентрация ^{90}Sr была отмечена нами в 2011 г. вблизи Днепро-Бугского лимана, что свидетельствует о продолжающемся поступлении этого радионуклида в Черное море со стоком р. Днепр. Вместе с тем неожиданно высокое содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs было обнаружено также вблизи Керченского пролива. Это не могло быть связано с поступлением черновбыльских радионуклидов из Азовского моря, поскольку, по данным статьи [11], их содержание в азовской воде снизилось к 2000 г. до $(9,6 \pm 3,8) \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{90}Sr и $(2,5 \pm 2,4) \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ для ^{137}Cs , т. е. уже тогда оно было значительно меньше, чем средние значения, обнаруженные нами в Черном море в 2011 г. ($(15 \pm 8) \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ и $(23 \pm 18) \text{ Бк} \cdot \text{м}^{-3}$ соответственно, см. табл. 1).

Таблица 1. Расположение станций отбора проб и содержание радионуклидов в поверхностной воде Черного моря и Северо-Крымского канала в 2011–2013 гг.

№ п/п	С. ш.	В. д.	Глубина, м	^{137}Cs , Бк·м ⁻³	$\pm 1\sigma$	^{90}Sr , Бк·м ⁻³	$\pm 1\sigma$	Расположение в Черном море
1	46°26,8'	31°23,1'	14	14,9	1,1	32,1	2,2	Р-н Днепро-Бугского лимана
2	46°02,9'	31°32,1'	20	—	—	14,2	1,4	СЗ шельф
3	45°37,2'	31°38,1'	45	15,2	0,5	7,6	1,4	СЗ шельф
4	44°40,7'	31°51,7'	698	—	—	11,0	1,4	СЗ материковый склон
5	43°20,0'	32°09,7'	2040	16,8	1,0	10,8	1,3	Западный глубоководный бассейн
6	45°46,6'	32°14,4'	31	—	—	6,7	1,3	Каркинитский залив
7	45°55,4'	33°16,2'	11	—	—	13,1	1,7	Каркинитский залив
8	45°09,2'	33°06,9'	45	—	—	9,8	1,3	Траверз Евпатории
9	44°26,5'	34°13,8'	87	—	—	22,1	1,7	Траверз Ялты
10	44°57,0'	36°26,0'	36	56,1	1,1	23,1	1,9	Прикерченский р-н
11	44°36,9'	33°30,2'	Прибрежная зона	12,8	0,2	13,0	1,2	Внешний рейд Севастополя — июнь, 2011
12	44°36,9'	33°30,2'	Прибрежная зона	17,1	0,9	13,4	2,5	Внешний рейд Севастополя — март–апрель, 2012
13	44°36,9'	33°30,2'	Прибрежная зона	16,5	0,8	9,8	1,4	Внешний рейд Севастополя — январь, 2013
14	46°07,1'	33°41,4'	Прибрежная зона	—	—	54,9	2,7	СКК (р-н Армянска) — июль, 2012

Примечание. Отбор проб на станциях, указанных под № 1–10, выполнен в августе 2011 г.; станции, указанные под № 1–6, расположены вдоль широтного разреза в северо-западной части Черного моря, обозначенного на рис. 1.

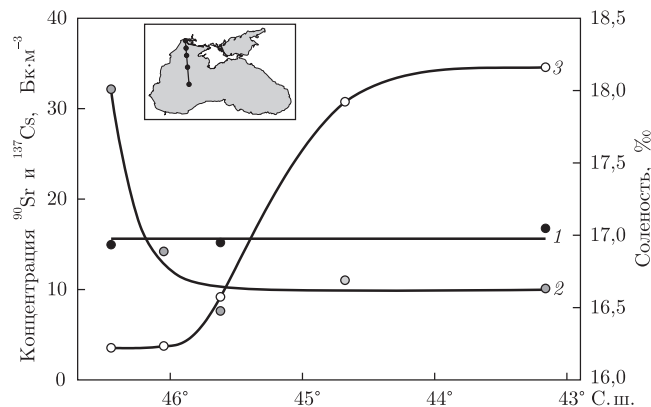


Рис. 1. Изменение концентрации ^{137}Cs (1) и ^{90}Sr (2) в поверхностной воде и ее соленость (3) вдоль широтного разреза от Днепро-Бугского лимана до западного глубоководного бассейна Черного моря в августе 2011 г.

На врезке схематично показано расположение станций на данном разрезе

Таким образом, можно предположить, что повышенное содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в прикерченском районе обусловлено поступлением в него днепровской воды по восточной ветке Северо-Крымского канала (СКК), который берет свое начало в Каховском водохранилище [12], отличающемся достаточно высокой степенью радиоактивного загрязнения после аварии на ЧАЭС [4, 5, 13]. Действительно, наши измерения показали, что концентрация ^{90}Sr в днепровской воде, отобранной в июле 2012 г. из СКК, составила около $55 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-3}$, т. е. была в 3,7 раза выше, чем средние значения для Черного моря в 2011–2013 гг. (см. табл. 1).

О продолжающемся влиянии речного стока на загрязнение Черного моря чернбыльскими радионуклидами свидетельствуют также результаты, полученные нами в августе 2011 г. вдоль широтного разреза от Днепро-Бугского лимана до западного глубоководного бассейна (рис. 1). Согласно данным, приведенным на графике, видно, что концентрация ^{90}Sr была наибольшей в приустьевой зоне и затем постепенно снижалась по мере удаления от берега. По иному вел себя ^{137}Cs , концентрация которого в поверхностной воде была практически одинаковой на всех станциях разреза, представленного на рис. 1. Это отражает различную геохимическую подвижность ^{90}Sr и ^{137}Cs в водосборных бассейнах.

Известно, что стронций находится в пресной и морской воде преимущественно в растворенном состоянии из-за относительно высокой концентрации в обеих средах его химического аналога — кальция, снижающего сорбцию ^{90}Sr почвами и взвешенным веществом [4, 5, 8, 9]. Для цезия растворенная форма преобладает только в морской воде, где сравнительно много его химического аналога — калия, которого, напротив, значительно меньше в пресноводной среде. Поэтому в речных бассейнах, в отличие от морских, ^{137}Cs активно сорбируется почвами, донными отложениями и взвесью, что существенно замедляет его миграцию [4, 5]. Установлено, что в отличие от ^{90}Sr , поступление которого в Черное море с водами рек Днестра и Дуная практически сравнялось с его атмосферными выпадениями после аварии на ЧАЭС, доля ^{137}Cs , поступившего с речным стоком, составила в 1994 г. всего 1–1,5% его общего содержания в Черном море [2]. В нашем случае, такое отличие геохимического поведения ^{90}Sr и ^{137}Cs проявилось в различном соотношении содержания этих радионуклидов вдоль широтного разреза. Вблизи Днепро-Бугского лимана это отношение было равно примерно 2, затем оно быстро уменьшалось по мере удаления в открытое море, составив всего 0,6 в центре западного глубоководного бассейна (см. данные в табл. 1 и на рис. 1).

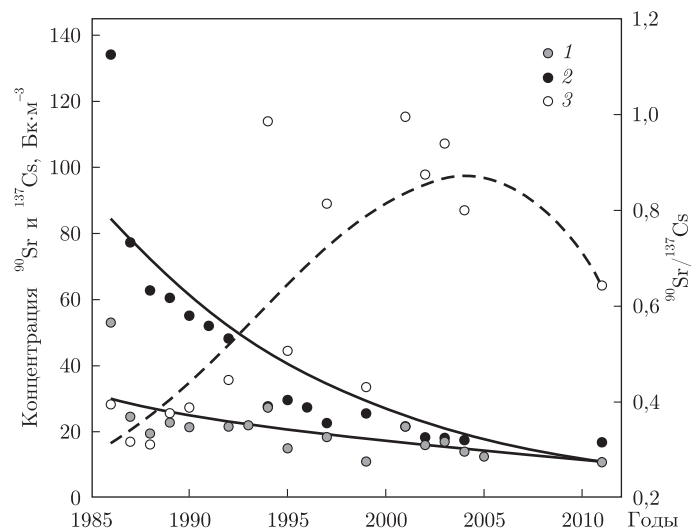


Рис. 2. Динамика концентраций ^{90}Sr (1) и ^{137}Cs (2) и их соотношение (3) в поверхностной воде западного глубоководного бассейна Черного моря после аварии на ЧАЭС

Столь значительные различия в динамике содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в черноморской воде проявились не только в пространственном, но и во временном отношении. На рис. 2 показана многолетняя изменчивость концентрации этих радионуклидов в поверхностном слое воды западного глубоководного бассейна Черного моря, откуда видно, что содержание ^{137}Cs снижалось достаточно монотонно с периодом полууменьшения всего около 7 лет. Это отражает значительный вклад процессов самоочистки морской среды, поскольку период полураспада ^{137}Cs намного больше — 30,17 года [2, 7]. Концентрация ^{90}Sr , напротив, практически не снижалась с конца 1980-х гг. (см. рис. 2), несмотря на то что период его полураспада меньше, чем у ^{137}Cs , и составляет 28,8 года. Соотношение активности $^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$ в данном случае изменялось от 0,3–0,4 в 1986–1987 гг. до 1,0 в конце 1990 — начале 2000-х гг. (см. рис. 2). Отмеченный в этот период максимум величины отношения концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs совпадает со значительным (почти в 4 раза) увеличением поступления ^{90}Sr в Черное море с водами рек Днепра и Дуная, произошедшего в результате усиления стока этих рек в 1995–1999 гг. [2, 6]. Это отразилось и на содержании ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях приустьевой зоны Днепро-Бугского лимана, в которых была выполнена геохронологическая реконструкция радиоактивного загрязнения с использованием методики, описанной, например, в работах [8, 9, 14].

Отметим, что на профиле вертикального распределения ^{90}Sr в указанных осадках существует два основных максимума — один на глубине, соответствующей 1986 г., т. е. периоду аварии на ЧАЭС, а второй — в поверхностном слое (рис. 3). По всей видимости, первый пик отражает поступление из р. Днепр и оседание в приустьевой зоне более подвижных форм ^{90}Sr , например, в составе речной взвеси, а второй — замедленную миграцию этого радионуклида вместе с частицами почв, подвергшихся эрозии, а также остатков сухопутных и речных организмов, накопивших ^{90}Sr . Очевидно, что этот механизм поступления ^{90}Sr из бассейна Днепра в Черное море с так называемым твердым стоком [8, 9, 15] является вторичным по сравнению с его поступлением в растворенном виде, тогда как для ^{137}Cs , из-за его меньшей геохимической подвижности в пресной воде, данный способ переноса в водосборных бассейнах может быть основным [9, 15]. Действительно, на про-

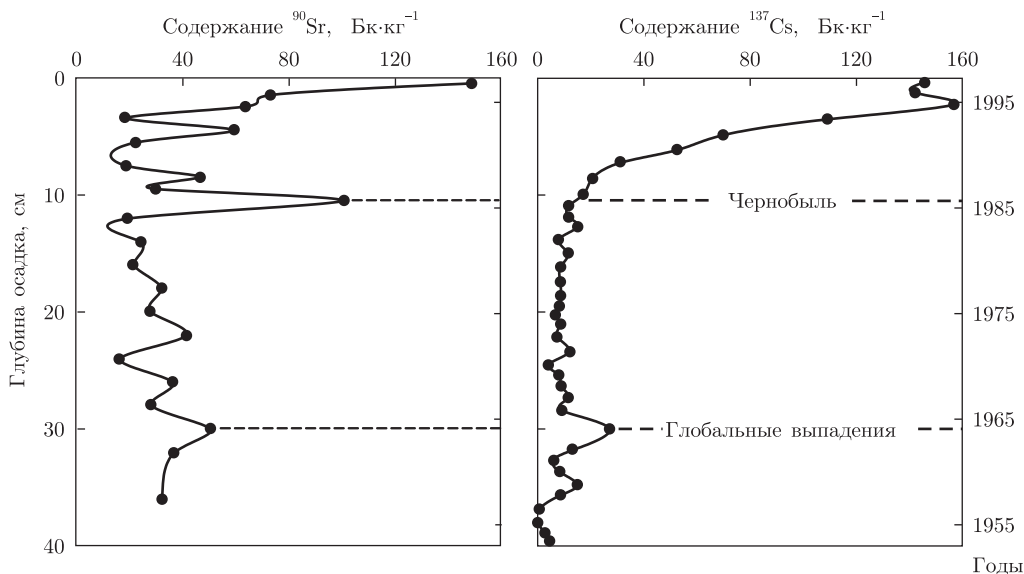


Рис. 3. Вертикальное распределение ^{90}Sr и ^{137}Cs в черноморских донных отложениях, отобранных в приустьевой зоне Днепро-Бугского лимана в 1997 г.

филе вертикального распределения ^{137}Cs в донных отложениях приустьевой зоны Днепро-Бугского лимана отсутствует максимум, приуроченный к 1986 г., а основное количество ^{137}Cs находится в самом верхнем слое осадков (см. рис. 3). Это показывает, что даже в 1997 г. (когда были отобраны донные отложения [8]), т.е. через 11 лет после чернобыльской аварии, содержание в них ^{137}Cs еще не достигло максимума. По всей видимости, столь значительное запаздывание поступления этого радионуклида из р. Днепр характеризует буферную емкость его водосборного бассейна, т.е. способность удерживать загрязняющие вещества, проявляющие высокую сорбционную активность в пресноводной среде [8, 9].

В целом рассмотренные данные о вертикальном распределении чернобыльских радионуклидов в донных отложениях прибрежной зоны Черного моря свидетельствуют о значительном вторичном поступлении ^{90}Sr и ^{137}Cs в Черное море с твердым речным стоком, которое достигло максимума в конце 1990-х гг. Интересно, что такой же эффект был обнаружен и в дочернобыльский период, когда основным источником радиоактивного загрязнения являлось выпадение радионуклидов после испытаний ядерного оружия в атмосфере. Так, анализ радиоэкологической базы данных ОРХБ ИнБЮМ НАН Украины [1, 2] показал, что в тот период наибольшее содержание ^{90}Sr в черноморской воде было отмечено в начале 1960-х гг., когда ядерные испытания достигли своего максимума. Затем оно снизилось примерно вдвое, однако во второй половине 1970-х гг., т.е. через 12 лет после максимальных выпадений, вновь возросло. Не исключено, что причиной этого, также как в постчернобыльский период, было замедленное поступление радионуклидов из водосборных бассейнов в составе твердого речного стока со сходным периодом запаздывания.

Отметим, что процесс вторичного радиоактивного загрязнения должен был отразиться и на содержании чернобыльских радионуклидов в других компонентах экосистемы Черного моря, в том числе в гидробионтах. Результаты нашего многолетнего радиоэкологического

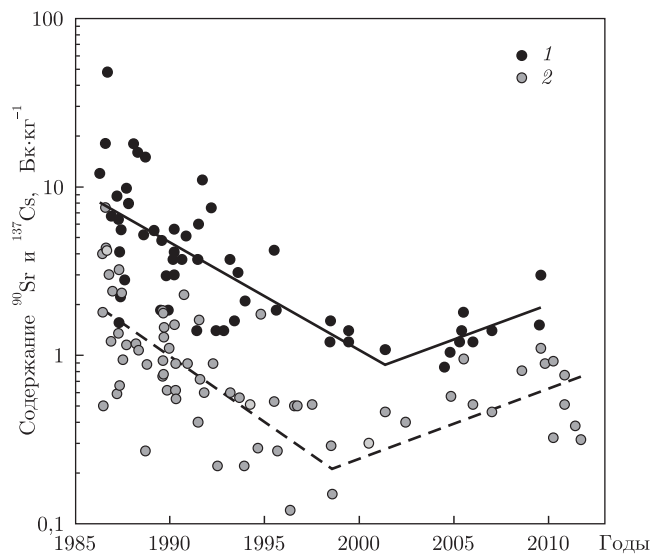


Рис. 4. Изменение содержания ^{137}Cs (1) и ^{90}Sr (2) в черноморской бурой водоросли *Cystoseira sp.* после аварии на ЧАЭС

мониторинга подтвердили это предположение и показали, что содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в бурой водоросли *Cystoseira sp.* после 1986 г. монотонно снижалось, но с конца 1990 — начала 2000-х гг. оно, наоборот, начало вновь возрастать (рис. 4). Для ^{90}Sr это можно объяснить, например, упомянутым выше четырехкратным увеличением поступления данного радионуклида из р. Днепр в конце 1990-х гг. за счет возросшего притока днепровских вод. При этом поступление ^{137}Cs из р. Днепр также возросло, хотя и в меньшей степени — не более чем в 1,5 раза по сравнению с предшествующими годами [2, 4–6]. Не исключено также, что дополнительным источником загрязнения черноморских гидробионтов ^{137}Cs могла стать его ремобилизация из донных отложений, расположенных в приустьевых зонах рек Дуная и Днепра, в которых суммарное содержание ^{137}Cs , выраженное в $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, на 1–2 порядка величин выше, чем в удаленных от берега акваториях Черного моря [2, 8].

Существенный вклад указанных процессов во вторичное радиоактивное загрязнение морской среды был обнаружен, например, в акватории Ирландского моря, прилегающей к району британского предприятия по переработке облученного ядерного топлива Селлафилд, на котором в 1950–80-е гг. произошли значительные выбросы радионуклидов [15]. В этих исследованиях было показано, что около 80% содержания ^{137}Cs в Ирландском море обусловлено его вторичным поступлением из донных осадков. В Черном море значительная геохимическая подвижность ^{137}Cs была также обнаружена нами в донных отложениях, прилегающих к устьевой зоне р. Чорох [9].

Таким образом, совокупность процессов замедленного поступления черноморских радионуклидов с твердым речным стоком, значительно усилившимся в период с 1995 по 1999 гг., а также возможность их ремобилизации из донных отложений в приустьевых зонах могли стать основными причинами вторичного радиоактивного загрязнения воды, донных осадков и гидробионтов Черного моря в конце 1990 — начале 2000-х гг. Это оказало существенное влияние на динамику содержания черноморских радионуклидов в Черном море и должно учитываться при оценке периода времени, когда оно достигнет доаварийного уровня. Например, в начале 1990-х гг. на основании имевшихся тогда результатов монито-

ринга было определено, что концентрация ^{90}Sr в черноморской воде в районе Днепро-Бугского лимана снизится до величин, зарегистрированных до аварии на ЧАЭС, к 2017 г. [2, 6]. Однако если учесть рассмотренную выше динамику вторичного радиоактивного загрязнения Черного моря, то можно определить, что это наступит существенно позже — примерно к 2025 г.

1. *Поликарпов Г. Г., Егоров В. М., Гулин С. Б. та ін.* Радіоекологічний відгук Чорного моря на Чорнобильську катастрофу // Вісн. НАН України. – 2008. – № 4. – С. 29–43.
2. *Egorov V. N., Gulin S. B., Polikarpov G. G., Osvath I.* Black Sea // Radionuclides in the Environment / Ed. D. A. Atwood. – Chichester (UK): Wiley, 2010. – P. 430–452.
3. *IAEA.* Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS). Radionuclide levels in oceans and seas // IAEA-TECDOC – 1429. Vienna: IAEA, 2005. – 215 p.
4. *Polikarpov G. G., Kulebakina L. G., Timoshchuk V. I., Stokozov N. A.* ^{90}Sr and ^{137}Cs in surface waters of the Dnepr River, the Black Sea and the Aegean Sea in 1987. – and 1988. – // J. Environmental Radioactivity. – 1991. – No 13. – P. 25–28.
5. *Polikarpov G. G., Livingston H. D., Kulebakina L. G. et al.* Inflow of Chernobyl ^{90}Sr to the Black Sea from the Dnepr River // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. – 1992. – No 34. – P. 315–320.
6. *Egorov V. N., Povinac 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. – No 43. – P. 137–155.
7. *Gulin S. B., Egorov V. N., Polikarpov G. G., Stokozov N. A., Mirzoyeva N. Yu., Tereschenko N. N., Osvath I.* General trends in radioactive contamination of the marine environment from the Black Sea to Antarctic Ocean // 25 Years after the Chernobyl accident / Ed. E. B. Burlakova, V. I. Naydich. – New York: Nova Sci. Publ., 2012. – P. 281–299.
8. *Gulin S. B., Polikarpov G. G., Egorov V. N. et al.* Radioactive contamination of the north-western Black Sea sediments // Estuarine, Coastal and Shelf Sci. – 2002. – No 54. – P. 541–549.
9. *Gulin S. B., Polikarpov G. G., Martin J.-M.* Geochronological reconstruction of ^{137}Cs transport from the Coruh river to the SE Black Sea: comparative assessment of radionuclide retention in the mountainous catchment area // Continental Shelf Research. – 2003. – No 23. – P. 1811–1819.
10. *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. // Атом. энергия. – 1988. – **65**, вып. 2. – С. 134–137.
11. *Матишов Г. Г., Буфетова М. В.* ^{90}Sr и ^{137}Cs в Азовском море после аварии на Чернобыльской АЭС // Докл. РАН. – 2002. – **383**. – С. 1–3.
12. *Природа Украинской ССР. Моря и внутренние воды* // В. Н. Грезе, Г. Г. Поликарпов, В. Д. Романенко и др. – Киев: Наук. думка, 1987. – 224 с.
13. *Кузьменко М. И., Гудков Д. И., Киреев С. И. та ін.* Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах. – Київ: Наук. думка, 2010. – 261 с.
14. *Мирзоева Н. Ю., Егоров В. Н., Поликарпов Г. Г.* Содержание ^{90}Sr в донных отложениях Черного моря после аварии на Чернобыльской АЭС и его использование в качестве радиотрассера для оценки скорости осадконакопления // Системы контроля окружающей среды: средства и мониторинг. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2005. – С. 276–282.
15. *Poole A. J., Denoon D. C., Woodhead D. S.* The distribution and inventory of ^{137}Cs in sub-tidal sediments of the Irish Sea // Radioprotection Colloquies. – 1997. – **32**. – P. 263–270.

*Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского НАН Украины,
Севастополь*

Поступило в редакцию 22.03.2013

С. Б. Гулін, Н. Ю. Мірзоєва, академік НАН України В. М. Єгоров,
І. Г. Сідоров, В. Ю. Проскурнін, Л. В. Гуліна

Вторинне забруднення Чорного моря техногенними радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС

На підставі даних радіоекологічного моніторингу та ядерно-геохронологічної реконструкції простежено динаміку радіоактивного забруднення Чорного моря за період 1986–2013 рр. з урахуванням внеску вторинних джерел чорнобильських радіонуклідів, до яких відноситься їх надходження з водозбірних басейнів і ремобілізація з донних відкладень. Встановлено, що сукупність цих процесів, а також варіабельність річкового стоку, який значно посилюється в 1995–1999 рр., могли стати основними причинами відзначеного наприкінці 1990 — початку 2000-х рр. збільшення вмісту ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді, донних відкладеннях і гідробіоті Чорного моря. Отримані дані дозволили істотно уточнити прогноз періоду часу, коли радіоактивне забруднення Чорного моря досягне доаварійного рівня.

S. B. Gulin, N. Yu. Mirzoeva, Academician of the NAS of Ukraine V. N. Egorov,
I. G. Sidorov, V. Yu. Proskurnin, L. V. Gulina

Secondary pollution of the Black Sea with man-made radionuclides after the Chernobyl accident

Based upon the data from the radioecological monitoring and the nuclear-geochronological reconstruction, the dynamics of radioactive pollution of the Black Sea has been traced for the period 1986–2013 taking the contributions of secondary sources of Chernobyl radionuclides into account, including their input from the catchment basins and remobilization from seabed sediments. It is found that the combination of these processes and the variability of river discharge, which became stronger in 1995–1999, may be the main reasons for the increase of the ^{90}Sr and ^{137}Cs concentrations in the Black Sea water, sediments, and biota observed in the late 1990s — early 2000s. The obtained data have allowed improving the prediction of a period, when the radioactive contamination of the Black Sea will reach the pre-accident level.