

**СОДЕРЖАНИЕ ^{90}Sr В ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЯХ ЧЕРНОГО МОРЯ
ПОСЛЕ АВАРИИ НА
ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС И ЕГО
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
В КАЧЕСТВЕ РАДИОТРАССЕРА ДЛЯ
ОЦЕНКИ СКОРОСТИ
ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ**

*Н. Ю. Мирзоева, В. Н. Егоров,
Г. Г. Поликарпов*

Институт биологии южных морей
им. А. О. Ковалевского НАН Украины,
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2
E-mail: natmirz@mail.ru

На основе результатов мониторинговых исследований построены карты перераспределения ^{90}Sr в донных отложениях (0–5 см) Черного моря с 1986 г. (авария на ЧАЭС) по 2000 год. Изучено распределение радионуклида ^{90}Sr в колонках донных отложений, отобранных в приустьевой зоне реки Чорох и районе Днепро-Бугского лимана. В профилях вертикального распределения этого радионуклида обнаружены пики повышенного содержания ^{90}Sr , соответствующие периоду радиоактивных выпадений ^{90}Sr , связанных с испытаниями атомного оружия в открытых средах, а также периоду радиоактивного загрязнения акваторий после аварии на ЧАЭС. Это позволяет дополнить датировками по ^{90}Sr разработанный ранее в ОРХБ (Отдел радиационной и химической биологии) метод оценки скорости осадконакопления в Черном море по профилям содержания ^{137}Cs .

Введение. Как известно [1–3], ^{90}Sr является одним из долгоживущих осколочных радионуклидов, попадающих в окружающую среду в результате ядерных взрывов и радиационных аварий. Черное море подверглось интенсивному загрязнению этим радиоизотопом после испытаний ядерного оружия в открытых средах, а также вследствие радиационной аварии на Чернобыльской АЭС. Основными путями поступления ^{90}Sr в акваторию моря являются глобальные атмосферные выпадения и сток рек, а элиминация осуществляется в результате радиоактивного распада (с постоянной времени полураспада 28,8 г.), выноса через проливы и депонирования в составе донных отложений.

Ежегодные глобальные выпадения бомбового ^{90}Sr на поверхность Земли от-

мечались в течение 1954–1970 гг. (13,0 ПБк и 0,5 ПБк соответственно). Общее количество ^{90}Sr , попавшее в верхние слои атмосферы и выпавшие на Землю за период с 1945 по 1963 гг., составило 1300 ПБк [3]. Количество ^{90}Sr , вынесенного в акваторию Черного моря с речным стоком в 1960–1964 годах, составило 16 % – 36 % от атмосферных выпадений [4].

После аварии на ЧАЭС в мае 1986 г. на поверхность Черного моря выпало 1,7 – 2,4 ПБк ^{137}Cs и примерно 0,3 ПБк ^{90}Sr [5, 6]. Радиоактивное загрязнение водной экосистемы Черного моря ^{90}Sr за период 1986–1995 гг. со стоком рек, преимущественно Днепра [7], а также за счет водопользования из Северо-Крымского канала [8, 9] составило 90,2 ТБк, а с водами реки Дунай – 24,5 ТБк [10, 11].

За период с 1986 по 2000 г.г. поток выноса ^{90}Sr из Черного моря через пролив Босфор составил 110,2 ТБк [12]. В то же время, до настоящего времени вопрос о содержании этого радионуклида в черноморских донных отложениях исследовался только эпизодически [6, 13].

Актуальность и научная новизна проводимых исследований состоит в том, что впервые на основе систематизации и обработки данных, полученных в ОРХБ ИнБЮМ за период 1986–2000 гг., по мониторинговому исследованию радиоактивного загрязнения Черного моря после аварии на ЧАЭС составлены карты пространственного перераспределения ^{90}Sr в поверхностном слое (0–5 см) донных отложений этого водоема. Усовершенствование методической базы радиохимического анализа по определению ^{90}Sr в донных отложениях позволило определить распределение радионуклида ^{90}Sr в колонках (до 40 см) черноморских донных отложений, отобранных в приустьевой зоне реки Чорох и районе Днепро-Бугского лимана. Анализ полученных результатов позволяет рассматривать радионуклид ^{90}Sr в качестве радиотрассера для определения геохронологии донных отложений Черного моря, дополнить датировками по ^{90}Sr разработанный ранее в ОРХБ геохронологический метод датировок донных осадков по профилям содержания ^{137}Cs .

Цель настоящей работы состояла в определении возможности использования радионуклида ^{90}Sr в качестве радиотрассера для геохронологии донных отложений, изу-

чении динамики пространственного перераспределения ^{90}Sr в донных отложениях (0–5 см) Черного моря для прогноза последствий аварии на ЧАЭС.

Для достижения данной цели решались следующие задачи: установить основные источники и количество поступления ^{90}Sr в окружающую среду (на акваторию Черного моря); построить карты пространственного перераспределения постчернобыльского ^{90}Sr в поверхностном слое донных отложений (0–5 см) Черного моря соответственно координатам отобранных проб; определить послойное содержание ^{90}Sr в колонках грунта Черного моря; сопоставить соответствие полученных результатов по восстановлению хронологии поступления ^{90}Sr в донные отложения Черного моря с таковыми по ^{137}Cs .

Материалы и методы. Материалом исследований служили донные отложения Черного моря (слой 0–5 см) в количестве 126 проб, отобранные ОРХБ ИнБЮМ в научно-исследовательских морских экспедициях в течение 1986–2000 гг. В ряде случаев отбор проб донных отложений осуществлялся в пределах 1 морской мили. Для таких групп проб рассчитывались средние значения концентрации ^{90}Sr .

Колонки грунта отбирали с борта научно-исследовательского судна (НИС) “Профессор Водяницкий” с помощью пробоотборника МУЛЬТИКОРЕР (МАГАТЭ) в 1997 г. (49 рейс НИС “Профессор Водяницкий”) в районе Днепро-Бугского лимана ($46^{\circ}33.024'$ с. ш. – $31^{\circ}25.040'$ в. д., глубина дна 13 м) и в 2000 г. (55 рейс НИС “Профессор Водяницкий”) в устье реки Чорох ($41^{\circ}39.656'$ с. ш. – $41^{\circ}33.231'$ в. д., 70 м).

Сразу после отбора колонки донных отложений были разделены вдоль всей отобранной глубины на поперечные слои толщиной от 2 до 10 мм с использованием тонкой алюминиевой фольги (общее количество проб – 76). В дальнейшем полученные слои донных отложений подверглись радиохимической обработке для определения в них концентрации ^{90}Sr . Измерения выполнялись по методикам [14] и на оборудовании, прошедшем интеркалибрацию под эгидой МАГАТЭ (Вена, Австрия) и РИСОЕ Национальной Лаборатории (Дания). Бета-активность ^{90}Sr рассчитывалась по ^{90}Y , измерялась по черенковскому излучению на низкофономом жидкостно-сцинтилляцион-

ном счетчике “Quantulus” Wallac-1220 с относительной погрешностью не выше 15%.

Результаты и обсуждение. По результатам определения ^{90}Sr в поверхностном слое донных отложениях Черного моря в соответствии с координатами отбора проб были построены карты перераспределения данного радионуклида в акватории изучаемого морского бассейна с течением времени (1986–2000 гг.) (рис. 1). Анализ полученных результатов (рис. 1) показал, что в 1986 г. отмечена неравномерность загрязнения радионуклидом ^{90}Sr донных отложений различных участков акватории Черного моря. По полученным результатам средняя концентрация данного радионуклида изменялась от 0,4 до 46,4 Бк кг⁻¹ сухой массы. Неравномерность распределения загрязнения донных отложений ^{90}Sr зависела от глубины залегания донных отложений и удаленности района от источников поступления данного радионуклида в морской бассейн. Так, в глубоководной части Черного моря (2000 м, рис. 1) концентрация ^{90}Sr в 1988 г. составляла (0,3 Бк кг⁻¹ сухой массы), что фактически соответствует уровням, определяемым в Черном море до аварии на ЧАЭС [13, 15]. Концентрация ^{90}Sr в донных отложениях устья реки Чорох (юго-восточная часть Черного моря) была также незначительной и в 2000 г. составляла 0,5 Бк кг⁻¹ сухой массы.

Увеличение концентрации ^{90}Sr в донных отложениях вдоль западного побережья Черного моря, юга Крыма, наблюдаемое в 1987–1988 гг. (рис. 1), по-нашему мнению, связано с гидрологическими процессами (прежде всего, течениями). Наиболее загрязненными постчернобыльским ^{90}Sr районами были участки морского дна, примыкающие к дельтам Днепра, Днестра, Дуная, территории расположения магистрального русла Северо-Крымского канала – регион полуострова Тарханкут, юго-восточная часть Крыма (район г. Феодосии). Подобная особенность в приуроченности наибольшего содержания ^{90}Sr к указанным районам не только сохраняется с течением времени (до 2000 г.), но и наблюдается процесс увеличения концентрации данного радионуклида в донных отложениях исследуемых регионов. Так, среднее значение концентрации ^{90}Sr в районе реки Днепр в 1987 г. было 28,5 Бк кг⁻¹, в 2000 г. – 148,2 Бк кг⁻¹ сухой

массы. Такой характер перераспределения ^{90}Sr показывает, что как в первые послеаварийные годы, так и в последующее время, поступление ^{90}Sr в акваторию Черного моря происходит, в основном, со стоком крупных рек в северо-западную часть Чер-

ного моря, сбросных вод Северо-Крымского канала. Эти источники поступления ^{90}Sr значительно преобладали над прямыми атмосферными выпадениями данного радионуклида в апреле–мае 1986 г. сразу после аварии на ЧАЭС.

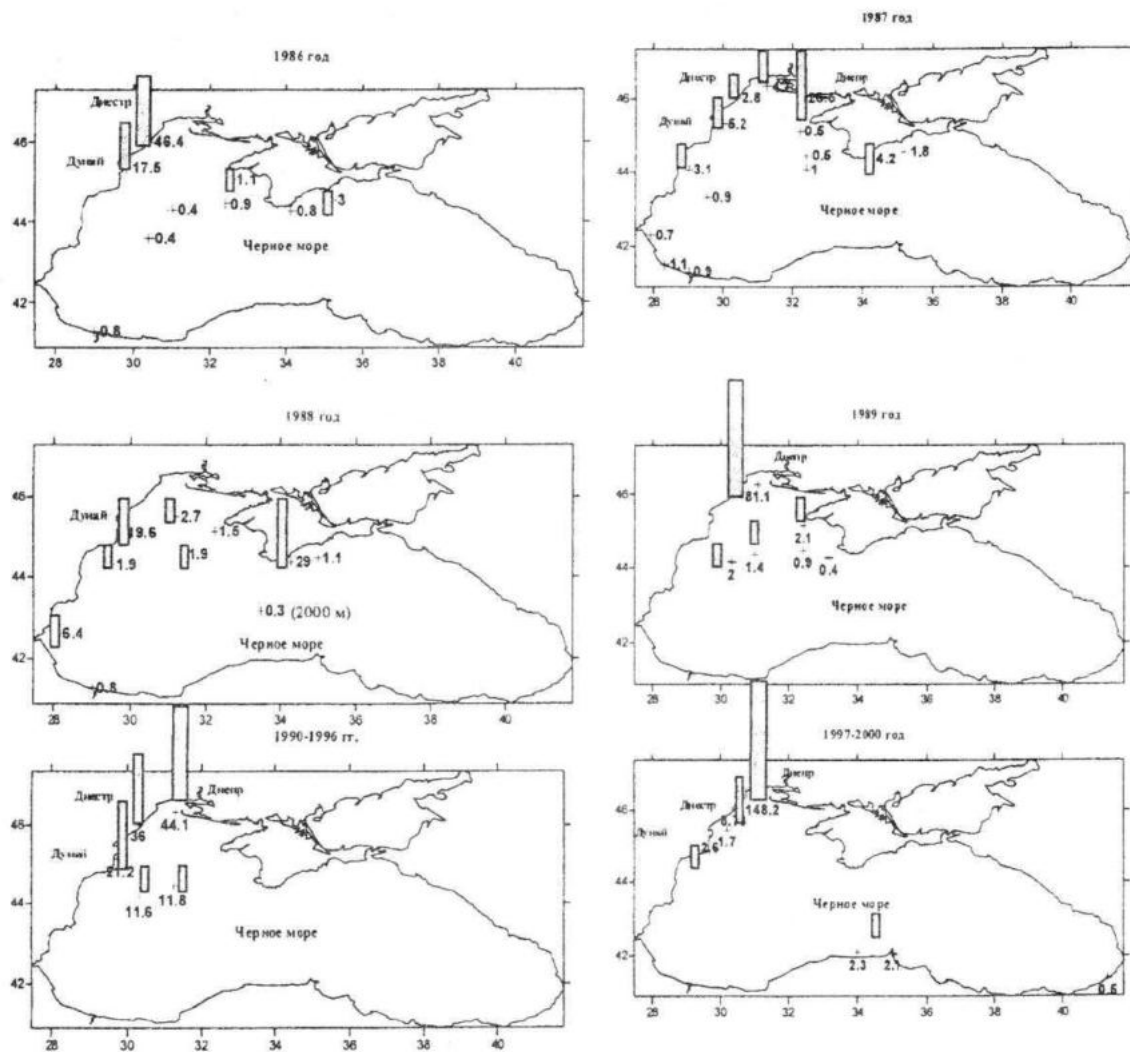


Рис. 1 – Карты перераспределения средней концентрации ^{90}Sr (Бк кг⁻¹ сухой массы) в донных отложениях (0–5 см) Черного моря с 1986 г. (авария на ЧАЭС) по 2000 год

Следует отметить, что все экстремальные повышения концентрации ^{90}Sr в каскаде Днепровских водохранилищ за прошедшие после аварии годы вызваны затоплением пойменных массивов ближней зоны ЧАЭС (1988, 1991, 1993, 1994, 1997–2000 гг.) [16]. Это отражалось впоследствии на радиационной ситуации всего Днепровского каскада, создавая волну повышенных концентраций ^{90}Sr в воде, что прослеживалось вплоть до Каховского

вплоть до Каховского водохранилища и Черного моря. Однако при изучении общей динамики изменения концентрации ^{90}Sr после аварии на ЧАЭС в водах открытой части Черного моря [17] нами отмечена тенденция к снижению содержания данного радионуклида до аварийных уровней.

На рисунках 2, 3 показаны вертикальные профили ^{90}Sr в колонках донных отложений различных районов Черного моря

(район Днепро-Бугского лимана, устье реки Чорох). Возраст донных осадков был определен по формуле, предложенной в работе [18], поставлен с таковым по распределению ^{137}Cs в параллельных колонках донных отложений [19–21].

Оказалось, что в профиле донных отложений, отобранных в районе Днепро-Бугского лимана (рис. 2 б), первый пик ^{90}Sr обнаруживается в слоях, соответствующих 1986–1987 гг. Это доказывает, что первый

пик на профиле вертикального распределения ^{90}Sr в исследуемых донных отложениях хронологически соответствует периоду аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 году. В вышележащих слоях донных отложениях наблюдается нарастание концентрации ^{90}Sr , что соответствует положению о продолжении хронического поступления данного радионуклида со стоком Днепра и заглуплении его в донные отложения.

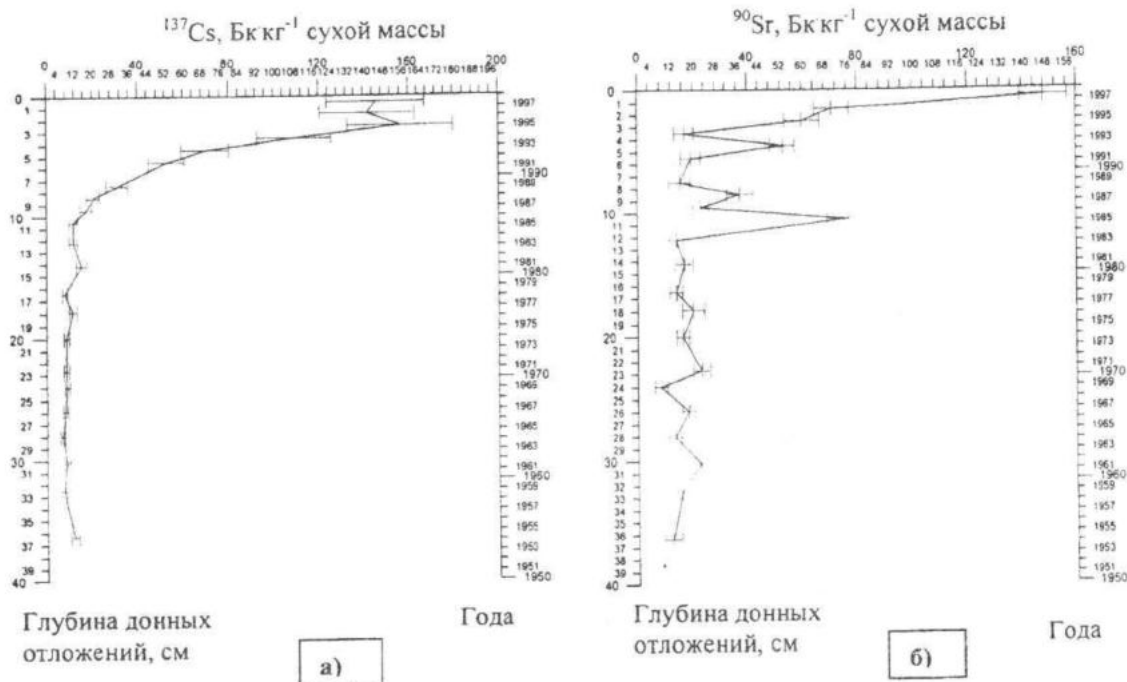


Рис. 2 – Вертикальное распределение и реконструкция хронологии поступления радионуклидов а) – ^{137}Cs , (С. Б. Гулин [18–20]) и б) – ^{90}Sr в донные отложения северо-западной части Черного моря (район Днепро-Бугского лимана)

В отличие от донных отложений Днепро-Бугского лимана, в донных отложениях у реки Чорох наибольшие пики ^{90}Sr соответствовали периоду 1950–1968 гг. (период глобального выпадения ^{90}Sr на поверхность Земли) (рис. 3 б). Чернобыльский пик ^{90}Sr в профиле этих донных отложений был значительно ниже (рис. 3 б). Такие различия в распределении бомбового и чернобыльского ^{90}Sr обусловлены тем, что глобальные радиоактивные выпадения после испытания ядерного оружия были достаточно равномерными над всей акваторией Черного моря и территорией водосборного бассейна [3, 4], а выпадение радионуклидов после аварии на ЧАЭС было неравно-

мерным, большая их плотность была обнаружена в северо-западной части Черного моря [12, 17]. Анализ литературных данных относительно химических форм радионуклидов после ядерных взрывов и в жидких отходах [22] показал, что среди растворимых соединений ^{90}Sr , в окружающую среду из глобальных выпадений попадают нерастворимые в водной среде соединения данного радионуклида (SrCO_3 , SrSO_4). Эти соединения радиоактивного стронция сорбируются на взвешях и донными отложениями водных экосистем, долгосрочно находясь в них как радиоактивная метка, характеризующая дату и источник поступления ^{90}Sr в окружающую среду.

Геохронологическая реконструкция многолетнего поступления ^{137}Cs из горных и равнинных рек в Черное море, датировка черноморских донных отложений по ^{137}Cs в

качестве радиотрассера были выполнены ранее в ОРХБ ИнБЮМ (рис. 2 а; рис. 3 а) [19–21].

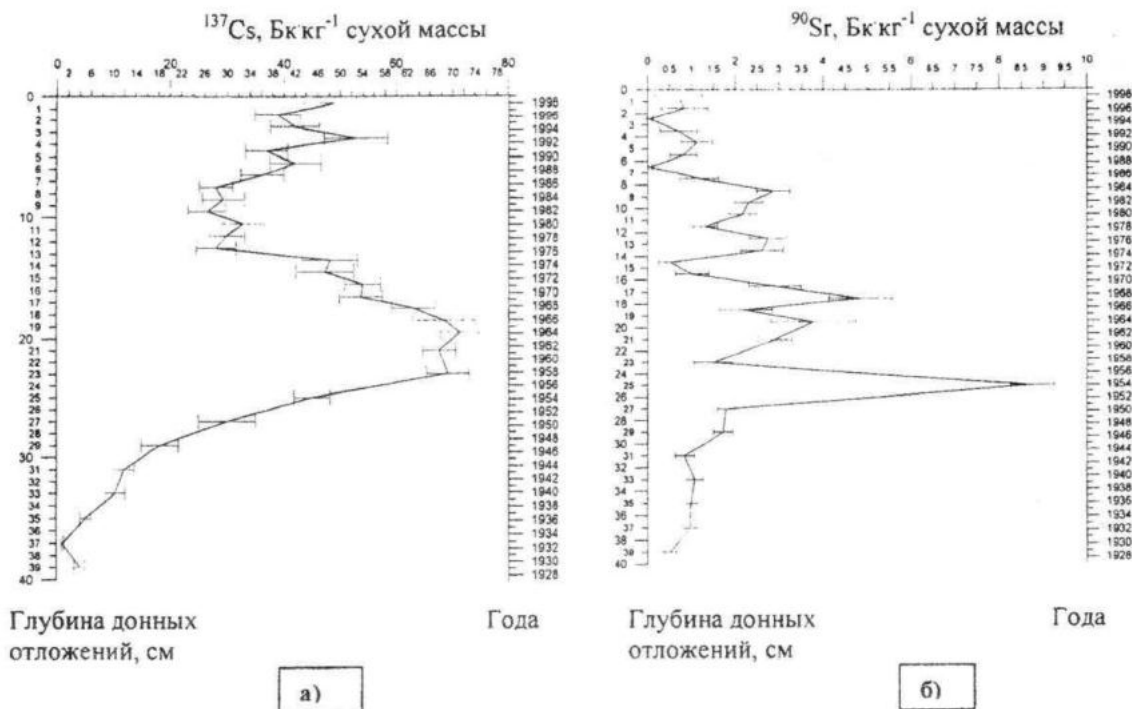


Рис. 3 – Вертикальное распределение и реконструкция хронологии поступления радионуклидов а) – ^{137}Cs , (С. Б. Гулин [18–20]) и б) – ^{90}Sr в донные отложения приустьевой зоны реки Чорох

Сравнение результатов по распределению ^{90}Sr в колонках донных отложений Черного моря с таковыми для ^{137}Cs выявило их практически сходный характер. Это позволило сделать вывод о возможности использования ^{90}Sr в качестве радиотрассера для определения геохронологии донных отложений Черного моря.

Выводы. По результатам определения содержания ^{90}Sr в донных отложениях Черного моря было установлено, что наиболее загрязненными районами этим осколочным радионуклидом являются участки морского дна, примыкающего к дельте Дуная, Днестра, Днепро-Бугскому лиману, полуострову Тарханкут, юго-восточной части Крыма. Это свидетельствует о поступлении радиостронция в акваторию Черного моря со стоком рек и водами Северо-Крымского канала, что подтверждается прямыми измерениями ^{90}Sr в низовьях Днепра и в СКК [8, 9]. При этом вынос ^{90}Sr с водами рек преоб-

ладал над его прямым атмосферным выпадением в результате аварии на ЧАЭС 1986 г. Самоочищение акватории Черного моря от поступающего в него постчернобыльского ^{90}Sr осуществляется за счет процессов радиоактивного распада радионуклида, выноса загрязнителя через пролив Босфор, постепенного перераспределения ^{90}Sr в донные отложения Черного моря. В донных отложениях ^{90}Sr находится преимущественно в необменной по отношению к морской воде форме.

Вертикальное распределение ^{90}Sr в колонке донных отложений, отобранных в районе реки Чорох и районе Днепро-Бугского лимана соответствуют геохронологическому перераспределению ^{137}Cs . ^{90}Sr , наряду с другими общепринятыми радионуклидами радиотрассерами, может рассматриваться как трассер для геохронологической реконструкции донных осадков. Это позволяет дополнить датировками по

^{90}Sr разработанный ранее в ОРХБ геохронологический метод датировок донных осадков по профилям содержания ^{137}Cs .

ЛИТЕРАТУРА

1. Апплби Л.Дж., Девелл Л., Мишра Ю.К. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиология после Чернобыля: Пер. с англ. Под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона. – М.: Мир, 1999. – 512 с.

2. Эйзенбад М. Радиоактивность внешней среды. – М.: Атомиздат, 1967. – 332 с.

3. Gudiksen P.H., Harvey T.F., Lange R. Chernobyl source term, atmospheric dispersion and dose estimation. – *J. Health Phys.* – 1989. – V. 57, № 5. – P. 697–705.

4. Геденов Л.И., Нелепо Б.А., Яковлева Г.В., Максимов И.Н., Сысоева Л.Н., Беляев Л.И. Изучение баланса долгоживущих осколочных радионуклидов в Черном море. – *Disposal of Radioactive wastes into seas, oceans and surface waters.* – Vienna: IAEA. – 1966. – P. 375–381.

5. Livingston H., Clarke W., Honjo S. et al. Chernobyl fallout studies in the Black Sea and other oceans areas. – *EML.* – 1986. – V. 460. – P. 214–223.

6. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г., Стокозов Н.А. Радиоактивное загрязнение вод, гидробионтов и донных отложений Черного моря после аварии на ЧАЭС через проливы Босфор в моря Средиземноморского бассейна. – Матер. Межд. конф. АСОПС “Загрязнение морей вокруг побережья СНГ (преимущественно, Арктики)”, Архангельск, 19–23 июня 1993. – Севастополь, Ч.2, 1993. – С. 82–84.

7. Поликарпов Г.Г., Кулебакина Л.Г., Тимошук В.И., Стокозов Н.А. Концентрация ^{90}Sr в водной среде Нижнего Днепра в направлении Черного моря. – Докл. Акад. Наук Украинской ССР – 1988. – Сер. Б, № 3. – С. 71–73.

8. Лазоренко Г.Е., Поликарпов Г.Г., Мирзоева Н.Ю., Коротков А.А. Радиологический мониторинг водной экосистемы северо-крымского канала и расположенных вдоль него орошаемых сельскохозяйственных угодий. – Матер. науч. семинара «Радиозэкология: Успехи и перспективы», Севастополь, 3–7 окт. 1994. – Севастополь, Т.1, 1996. – С. 148–162.

9. Мирзоева Н.Ю. Миграция ^{90}Sr в пресноводных экосистемах ближней зоны ЧАЭС и юга Украины. – Матер. науч. семинара «Радиозэкология: Успехи и перспективы», Севастополь, 3–7 окт. 1994. – Севастополь, Т.1, 1996. – С. 163–169.

10. Egorov V.N., Povinec P.P., Polikarpov G.G., Stokozov N.A., Gulin S.B., Kulebakina L.G., Osvath I. ^{90}Sr and ^{137}Cs in the Black Sea after the Chernobyl NPP accident: inventories, balance and tracer applications. – *J. of Environmental Radioactivity.* – 1999. – V. 43. – P. 137–155.

11. Egorov V.N., Polikarpov G.G., Stokozov N.A., Gulin S.B., Mirzoyeva N.Yu. Assessment of the Black Sea response time-scale to pollution with ^{90}Sr and ^{137}Cs following the Chernobyl NPP accident. – *Rapport du 36e Congress de la CIESM: 36th CIESM Congress Proceedings, Monte-Carlo, Monaco, V. 36, 2001.* – P. 121.

12. Egorov V.N., Polikarpov G.G., Stokozov N.A., Mirzoyeva N.Yu. Estimation and prediction of ^{90}Sr and ^{137}Cs outflow from the Black Sea via the Bosphorus Strait after the NPP Chernobyl accident. – *Abstract book of material of the Intern. Workshop “Clean Black Sea” (EC SSA Project INCO-CT-2004-003510), (Varna, Bulgaria, 2nd – 5th June, 2005).* – Varna, Bulgaria, 2005. – P. 54–57.

13. Молисмология Черного моря /АН Украины. Ин-т биологии южных морей им. А.О. Ковалевского: Под ред. Г.Г. Поликарпова. – Киев: Наук. думка, 1992. – 301 с.

14. Harvey B.K., Ibbett R.D., Lovett M. B., Williams K.J. Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials. – *Aquatic Env., Prot.: Analytical Methods.* – Lowestoft, 1989. – 33 p.

15. Баранник В. П. Концентрация и пространственное распределение стронция-90 в Черном и Азовском морях и их взаимосвязь с отдельными гидрофизическими и гидрохимическими процессами. – *Океанология.* – 1974. – Т. 14, Вып. 2. – С. 274–281.

16. Voitsekhovitch O. V., Kanivets V. V., Krysthuk B. F. et al. Project RER/2/003 Status Report of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute for 2000–2001. – *Marine Environmental Assessment of the Black Sea: Working Material of Regional Co-operation Project RER/2/003 (Vienna, 22 January 2004).* – Vienna, Austria, 2004. – 83 p.

17. Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Осват И., Стокозов Н.А., Гулин С.Б., Мирзоева Н. Ю. Радиоэкологический отклик Черного моря на Чернобыльскую ядерную аварию в отношении долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs . – Морской экологический журнал. – 2002. – Т. I, Вып. 1. – С. 5–15.
18. Жерко Н.В., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Малахова Л.В. Полихлорбифенилы в компонентах экосистемы Севастопольской бухты. – Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – 2001. – Вып. 2. – С. 153–158.
19. Gulin S.B., Aarkrog A., Polikarpov G.G., Nielsen S.P., Egorov V.N. Chronological study of ^{137}Cs input to the Black Sea deep and shelf sediments. – Radioprotection. – 1997. – V. 32 (C2). – P. 257–262.
20. Гулин С.Б., Поликарпов Г.Г., Ааркrog А., Егоров В.Н., Нильсен С., Стокозов Н.А. Геохронологическое исследование поступления ^{137}Cs в донные отложения северо-западного шельфа, континентального склона и глубоководной части Черного моря. – Доп. Акад. Наук України. – 1997. – № 7. – С. 133–139.
21. Gulin S.B., Polikarpov G.G., Egorov V.N., Martin J.-M., Korotkov A.A., Stokozov N.A. Radioactive contamination of the northwestern Black Sea sediments. – Estuarine, Coastal and Shelf Science. – 2002. – V. 54, № 3. – P. 541–549.
22. Шведов В.П., Патин С.А. Радиоактивность морей и океанов. – М.: Атомиздат, 1968. – 288 с.