

# ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ И ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ $^{90}\text{Sr}$ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВОДОЁМОВ УКРАИНЫ ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС

*Н.Ю. Мирзоева*

Институт биологии южных морей НАН Украины (ИнБЮМ),  
г. Севастополь, пр. Нахимова, 2,  
E-mail: natmirz@mail.ru

*Проанализированы результаты изучения закономерности динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях водоёмов бассейна реки Днепр и Чёрного моря после аварии на ЧАЭС. Дана сравнительная оценка коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  донными отложениями водоёмов. Определены скорости осадконакопления и сделаны оценки потоков поступления  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения Чёрного моря.*

**Введение.** Известно [1], что биогеохимический цикл, берущий начало с поступлением радиоактивных веществ в водную среду, завершается их седиментационным поступлением в геологические депо в составе донных отложений. Ввиду высокой сорбционной емкости грунтов и прочности фиксации в них радионуклидов, водные грунты способны надолго удерживать поглощенные радионуклиды, становясь основным источником облучения водных организмов [2]. Приоритетность исследований, в первую очередь, относилась к такому экологически опасному источнику поставарийного радиоактивного загрязнения среды как долгоживущий осколочный радионуклид  $^{90}\text{Sr}$ . Особенностью чернобыльской аварии было то, что радиоактивное загрязнение окружающей среды произошло на масштабе времени значительно меньшем, чем характерное время протекания биогеохимических процессов. Поэтому  $^{90}\text{Sr}$ , в качестве радиотраскера, может характеризовать интенсивность гидрологических и биогеохимических процессов, происходящих в водных экосистемах.

Цель данной научно-исследовательской работы состояла в определении закономерностей динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  после аварии на ЧАЭС в донных от-

ложениях водоёмов Украины различно удалённых от района аварии; оценке скорости осадконакопления и потоков поступления поставарийного  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения Чёрного моря.

Для достижения цели решались следующие задачи: изучить закономерности динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, Северо-Крымского канала (СКК), Чёрного моря в период 1986–2009 гг.; проанализировать и сделать сравнительную оценку коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  донными отложениями пресноводных и морского водоёмов с разной степенью удалённости от аварийной ЧАЭС; используя метод хронологической датировки донных отложений Чёрного моря по  $^{90}\text{Sr}$ , определить скорость осадконакопления и потоки  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения моря.

**Материалы и методы.** Материалом исследования служили результаты определения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в 377 пробах 0–5 см слоя донных отложений, отобранных в сухопутных и морских экспедициях в период 1986–2009 гг. Также использовались база данных ОРХБ по концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах экосистем Чёрного моря и литературные данные [2–6]. Колонки грунта отбирали с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Профессор Водяницкий» (60 рейс) с помощью пробоотборника «Мультикорер» в 2004 г. в широте грязевого вулкана ( $44^{\circ}33'$  с.ш. и  $31^{\circ}43'$  в.д., глубина 821 м), в 2009 г. – с борта маломерного судна в Стрелецкой бухте района Севастополя ( $44^{\circ}36'$  с.ш. и  $33^{\circ}28'$  в.д., глубина 3,5 м). 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 – 106).

Метод определения  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях соответствует общепринятым в мировой практике и основан на: радиохимическом выделении радионуклида, измерении активности  $^{90}\text{Sr}$  по черенковскому излучению его дочернего продукта  $^{90}\text{Y}$  с использованием низкофонового жидкостного сцинтилляционного счётчика (LSC) LKB «Quantulus 1220».

последующей математической обработке данных [7]. Нижний предел определяемой активности (LLD) составляет 0.01–0.04 Бк·кг<sup>-1</sup> сухой массы пробы. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20%.

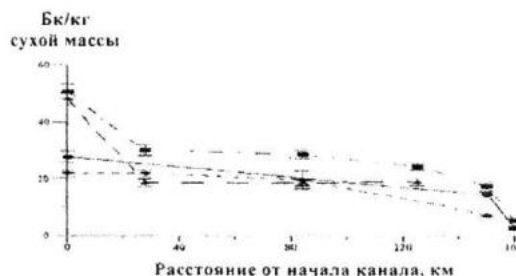
**Результаты и обсуждение.** Анализ собственных и литературных данных показал, что динамика концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, СКК и Чёрного моря после аварии на ЧАЭС носила следующий характер:

- первичное загрязнение поставарийным <sup>90</sup>Sr было мозаичным. По нашим расчётам в первые месяцы после аварии концентрация радионуклида в донных отложениях по сравнению с доаварийными уровнями увеличилась в среднем в 3371 раз в водоёме-охладителе ЧАЭС, в 6–300 раз в Киевском водохранилище; примерно в 1.5–5.3 раза в Каховском водохранилище и СКК; в 3.6–150 раз в донных отложениях приустьевых районов северо-западной части и Крымского побережья Чёрного моря.

- вторичное поступление растворённого <sup>90</sup>Sr с водами рек в 1987 г. привело к увеличению концентрации <sup>90</sup>Sr в поверхностном слое донных отложений по сравнению с доаварийным уровнем по нашим расчетам в 2 раза – в Киевском и Каховском водохранилищах. Увеличение концентрации <sup>90</sup>Sr в 1.8 раз в 1989 г. по сравнению с 1986 г. в поверхностном слое донных отложений отмечалось в устьевых районах рек Днестр, Дунай, Крымского побережья Чёрного моря. Среднее значение концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях Чёрного моря было в 2.2 раза меньше, чем в донных отложениях СКК.

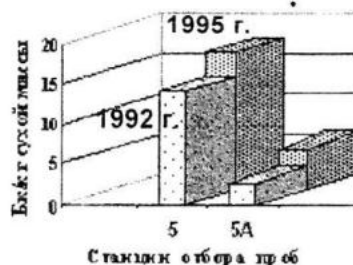
- определено, что в период 1986–2004 гг. наиболее загрязнёнными <sup>90</sup>Sr являются участки дна Чёрного моря, примыкающие к дельте Дуная, Днестра, Днепровско-Бугскому лиману, полуострову Тарханкут, юго-восточной части Крыма. Это свидетельствует о поступлении радиостронция в акваторию Чёрного моря со стоком рек и водами Северо-Крымского канала, что подтверждается прямыми измерениями <sup>90</sup>Sr в низовьях Днепра и в СКК.

Примером изменения концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях водоёмов, в зависимости от их удалённости от ЧАЭС, являются результаты мониторингового исследования (1992–1995 гг.) уровней концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях магистрального русла СКК (рис. 1).



Р и с. 1. Изменение концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях магистрального русла СКК в период 1992–1995 гг. (овалы, треугольники, ромбы и прямоугольники, соответственно)

Наблюдается (рис. 1) уменьшение концентрации радионуклида в донных отложениях по мере удаления мест отбора проб от начала СКК. На расстоянии 150 км от начала магистрального русла концентрация <sup>90</sup>Sr донных отложений составляла 33–52 % от концентрации в начале канала. Очевидно, что поступивший в водную среду <sup>90</sup>Sr, со временем перераспределяясь между живыми и косными компонентами этой экосистемы, накапливается в донных отложениях водоёма. Описанные закономерности подтверждались и результатами по определению концентрации <sup>90</sup>Sr в донных отложениях сбросных и отводных каналов СКК (рис. 2).



Р и с. 2. Концентрация <sup>90</sup>Sr в донных отложениях магистрального русла СКК (ст. 5) и сбросном канале (ст. 5А), в 1992 г. и 1995 г.

Сравнение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях, отобранных на станциях № 5 (вход воды на поливные участки) и № 5А (сброс воды с орошаемых сельскохозяйственных угодий), показало, что часть  $^{90}\text{Sr}$  в процессе орошения сорбируется орошаемой почвой и взвешенным веществом. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях сбросного канала (№ 5А) в июле 1992 г. и 1995 г. составляла 19% и

31%, соответственно, от концентрации радионуклида в магистральном русле СКК.

В табл. 1 показана зависимость концентраций и коэффициентов накопления ( $K_{\text{н}}$ ) поставарийного  $^{90}\text{Sr}$  донными отложениями пресных и морского водоёмов Украины от степени их удалённости от аварийной ЧАЭС.

Таблица 1

Концентрации и  $K_{\text{н}}$   $^{90}\text{Sr}$  донными отложениями водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, СКК в 1988–1995 гг.

Водоём	Представление данных	Концентрация $^{90}\text{Sr} \pm \sigma$ , Бк·кг <sup>-1</sup> сухой массы	$K_{\text{н}}$ $^{90}\text{Sr}$ , единицы
Водоём-охладитель ЧАЭС	Среднее значение	2641.7 ± 396.3	2247.8 ± 449.6
	Диапазон изменений	117.0–8970.0	133.8–7800.0
Киевское водохранилище	Среднее значение	315.8 ± 47.4	1147.4 ± 172.1
	Диапазон изменений	114.0–822.0	152.0–2733.3
Каховское водохранилище	Среднее значение	52.6 ± 7.9	230.2 ± 47.8
	Диапазон изменений	38.7–64.7	172.4–297.2
Северо-Крымский канал	Среднее значение	19.2 ± 2.9	193.0 ± 38.6
	Диапазон изменений	2.7–50.7	50.9–607.6
Чёрное море	Среднее значение	8.6 ± 1.3	356.9 ± 71.4
	Диапазон изменений	0.4–81.1	11.2–1705.5

Получено (табл.1), что средние концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, Чёрного моря уменьшаются на порядок по мере удаления от аварийной АЭС, с наибольшей концентрацией радионуклида в донных отложениях водоёма-охладителя ЧАЭС, равной 2641.7±396.3 Бк·кг<sup>-1</sup> сухой массы. Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях СКК такого же порядка, как и в Каховском водохранилище, но почти в 3 раза меньше. Среднее значение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях Чёрного моря было в 2.2 раза меньше, чем в донных отложениях СКК. Установлено, что в донных отложениях водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Ка-

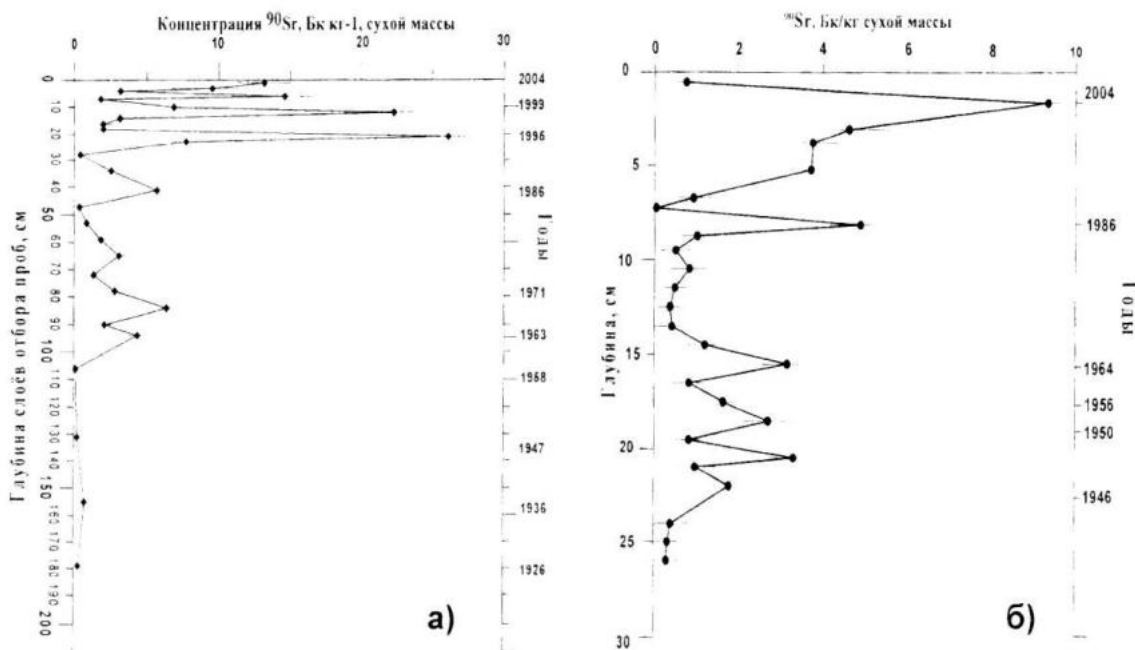
ховского водохранилищ, СКК и Чёрного моря концентрация  $^{90}\text{Sr}$  уменьшалась по мере удаления от ЧАЭС со следующим соотношением: 100 : 10 : 2 : 0.7 : 0.3 (%), соответственно.

Из табл. 1 видно, что уровень загрязнения радиоактивным стронцием водоёма-охладителя ЧАЭС и Чёрного моря различается на два порядка, а максимальные границы диапазона коэффициентов накопления в водоёмах – одного порядка. Это свидетельствует о схожих механизмах поступления и закрепления  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения пресных и морского водоёмов Украины. Поскольку в исследуемых водоёмах донные отложения были разного происхождения и состава [2, 4–6], основным фактором, оп-

ределяющим загрязнение донных осадков поставарийным  $^{90}\text{Sr}$  – это поступление и закрепление в грунтах нерастворимых в воде соединений стронция.

Произведён анализ результатов по вертикальному распределению концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в колонках донных отложений Чёрного моря, отобранных в сипе грязевого вулкана (рис. 3а) и Стрелецкой бухте района Севастополя (рис. 3б). По-

казано наличие пиков повышенного содержания этого радионуклида, соответствующих периоду радиоактивных выпадений  $^{90}\text{Sr}$ , связанных с испытаниями атомного оружия в открытых средах, а также периоду радиоактивного загрязнения акваторий после аварии на ЧАЭС.



Р и с. 3. Вертикальные распределения и реконструкция хронологии поступления  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения Чёрного моря в районе сипа грязевого вулкана (а) и в бухте Стрелецкой района Севастополя (б)

Используя  $^{90}\text{Sr}$  в качестве радиотрасера [8], выполнена датировка отобранных в колонках донных отложений, что в свою очередь позволило определить скорость осадконакопления в исследуемых районах моря. Получено, что скорость осадконакопления за год в сипе грязевого вулкана на континентальном склоне Чёрного моря равна в среднем 22,8 мм, а в бухте Стрелецкой – 3,5 мм.

На основе полученных нами и представленных в литературе данных по скорости седиментации взвешенного вещества [9, 10] в различных районах Чёрного моря и средней концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в поверхностном слое донных отложений этих регионов выполнена усредненная оценка потоков радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  в

донные отложения водоёма, то есть определена скорость самоочищения водной толщи моря от поставарийного радионуклида. При этом районирование потоков следующее: Днепровско-Бугский лиман ( $297.64 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) > сип грязевого вулкана на континентальном склоне ( $53.50 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) > взморье Дуная ( $47.53 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) > континентальный склон ( $8.10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ )  $\approx$  Севастопольская бухта ( $7.10 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) > устье р. Чорох ( $1.54 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ) > глубоководная зона ( $0.02 \text{ Бк}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{год}^{-1}$ ).

**Заключение.** Сравнительное изучение изменения концентраций  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях водоёмов Украины, различно удаленных от аварийной ЧАЭС, позволило определить основные законо-

мерности распределения и миграции  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях исследуемых экосистем от водоёма-охладителя ЧАЭС вплоть до Чёрного моря, включительно.

Установлено, что к 2009 г., отражая степень удаления от ЧАЭС, в водоёме-охладителе ЧАЭС, Киевском водохранилище, Каховском водохранилище, СКК и Чёрном море в донных отложениях в среднем сформировались следующие соотношения концентраций  $^{90}\text{Sr}$ : 100% : 10% : 2% : 0.7% : 0.3 (%).

Определено, что диапазон изменения коэффициентов накопления  $^{90}\text{Sr}$  для донных отложений мало зависел от удалённости водоёмов от места аварии, что свидетельствовало о схожих механизмах поступления и закрепления  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения водных экосистем.

На основе хронологической датировки донных отложений Чёрного моря по  $^{90}\text{Sr}$  были определены скорости осадконакопления, которые соответствуют скоростям поступления различных загрязнителей в конечное депо – донные отложения водоёма. Практическую значимость, как фактор самоочищения водной толщи экосистемы, имеет также оценка потоков поставарийного радионуклида  $^{90}\text{Sr}$  в донные отложения Чёрного моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Егоров В.Н.* Нормирование потоков антропогенного загрязнения черноморских регионов по биогеохимическим критериям // *Экология моря*. 2001. – Вып. 57. – С. 75–84.
2. *Гудков Д.І.* Радіонукліди в компонентах водних екосистем зони відчуження Чорнобильської АЕС: розподіл, міграція, дозові навантаження, біологічні ефекти: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра біол. наук: спец. 03.00.01 “Радиобіологія” / Д. І. Гудков – Київ, 2006. – 34 с.
3. *База даних ОРХБ* (за період 1964–2006 гг.): Вода. Гидробионты. Донные отложения [Электронный ресурс]; разработана Д. Б. Евтушенко, В.Н. Егоровым, 1992. – Севастополь: ОРХБ, ИнБИОМ, 2006. – Систем. требования: Pentium-266; 32 Mb

RAM; Windows 98; программный пакет Paradox.

4. *Кулебакина Л.Г.* Изучение миграции  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в экосистемах шельфа Чёрного моря и нижнего Днепра после Чернобыльской аварии // *Радиоэкология: успехи и перспективы: междунар. науч. семинар, 3–7 окт. 1994 г.: материалы*. – Севастополь, 1996. – С. 127–141.
5. *Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС: [монография] / [В.Д. Романенко, М.И. Кузьменко, Н.Ю. Евтушенко и др.]; отв. ред. Д.М. Гродзинский*. – К.: Наук. думка, 1992. – 193 с. – (Серия «Чернобыль» Pu, Sr, Cs).
6. *Kryshev I.I.* Radioactive contamination of aquatic ecosystems following the Chernobyl accident / I.I. Kryshev // *J. Environ. Radioactivity*. – 1995. – Vol. 27, № 3. – P. 207–220.
7. *Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials : analytical methods / B.K. Harvey, R.D. Ibbett, M.B. Lovett, K.J. Williams*. – Lowestoft : S. a., 1989. – 33 p.
8. *Мирзоева Н.Ю., Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г.* Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в донных отложениях Чёрного моря после аварии на Чернобыльской АЭС и его использование в качестве радиотрасера для оценки скорости осадконакопления // *Системы контроля окружающей среды / Средства и мониторинг*. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – С. 276–282.
9. *Gulin S.B., Aarkrog A., Polikarpov G.G., Nielsen S.P., Egorov V.N.* Chronological study of  $^{137}\text{Cs}$  input to the Black Sea deep and shelf sediments. – *Radioprotection*. – 1997. – V. 32 (C2). – P. 257–262.
10. *Gulin S.B., Polikarpov G.G., Egorov V.N., Martin J.-M., Korotkov A.A., Stokozov N.A.* Radioactive contamination of the north-western Black Sea sediments. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2002. – V. 54, № 3. – P. 541–549.