

# ТЕНДЕНЦИИ ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ СТРОНЦИЯ-90 В ВОДЕ ВОДОЁМОВ БЛИЖНИХ И ЗНАЧИТЕЛЬНО УДАЛЕННЫХ ОТ АВАРИЙНОЙ ЧАЭС

*Н.Ю. Мирзоева, С.И. Архипова,  
Н.Ф. Коркишко, Л.В. Мизаль,  
Ю.Г. Марченко*

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

*Выполнено комплексное сравнительное изучение динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, Северо-Крымского канала (СКК) и акватории Чёрного моря после аварии на ЧАЭС в период с 1986 по 2006 гг. Определены основные закономерности распределения и миграции  $^{90}\text{Sr}$  в воде исследуемых объектов, сделаны прогнозы времени уменьшения концентрации радионуклида к доаварийному уровню.*

**Введение.** 26 апреля 1986 г. на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС) произошла авария, явившаяся крупнейшей ядерной катастрофой XX века [1]. В результате атмосферного переноса радиоактивных продуктов и аэрозольных частиц произошло первичное радиоактивное загрязнение водных экосистем, расположенных как вблизи места взрыва, так и на значительном удалении от него, включая регион Чёрного моря [2, 3].

Целью проводимых исследований было: выявить тенденции изменения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёмов Украины ближних и значительно удаленных от аварийной ЧАЭС. В связи с поставленной целью решались задачи: определить закономерности динамики концентрации и миграции  $^{90}\text{Sr}$  в воде исследуемых водоёмов, его запас и степень самоочищения водной толщи исследуемых водоёмов от поставарийного  $^{90}\text{Sr}$ ; спрогнозировать масштабы времени уменьшения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  к доаварийному уровню в воде пресных и морского водоёмов Украины.

Научная новизна проводимых исследований состоит в том, что на основе анализа многолетних природных наблюдений определены закономерности изменения во времени концентрации и перераспределения

$^{90}\text{Sr}$  в воде пресных водоёмов Украины и Чёрного моря, имеющих различную степень удалённости от аварийной ЧАЭС, получены прогнозы времени уменьшения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в водной среде исследуемых водоёмов к доаварийным уровням.

**Материалы и методы.** Материалом исследования служили результаты определения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, СКК и Чёрного моря в период 1986–2006 гг. Также использовались база данных ОРХБ по концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в компонентах экосистем Чёрного моря и литературные данные. За период исследования было обработано и проанализировано 1341 проба воды исследуемых водоёмов.

Для определения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёмов использовали метод, соответствующий общепринятым в мировой практике и основанный 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 [4, 5]. Нижний предел определяемой активности (LLD) составлял 0.01–0.04 Бк·кг<sup>-1</sup> (Бк·м<sup>-3</sup>) пробы. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 15 %. Данные по интеркалибрации методов определений, полученные по результатам измерений эталонных проб и полевых параллельных определений между ОРХБ ИнБИОМ и другими институтами, свидетельствовали, что используемая методическая база позволяет с необходимой и достаточной степенью достоверности оценивать загрязнение изучаемых экосистем долгоживущим радионуклидом  $^{90}\text{Sr}$ .

**Результаты и обсуждение.** На основании полученных нами и литературных [1–3, 6–10] данных выявлены следующие закономерности поэтапной реакции водной среды водоёмов на Чернобыльскую аварию:

– первичное повышение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде по сравнению с доаварийными уровнями в первые месяцы после аварии: в 100 тысяч раз в водоёме-охладителе ЧАЭС, в 309 раз в Киевском водохранилище; в 9 раз в Каховском водохранилище и СКК; в

среднем в 3 раза в воде различных районов Чёрного моря;

– нами установлено, что последующее резкое, в течение 1–2 лет, снижение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёмов происходило за счет: миграции радионуклида в ниже расположенные водоёмы; перераспределения между компонентами экосистем; в Чёрном море, в основном, за счет перемешивания в слое 0–50 м и миграции  $^{90}\text{Sr}$  в глубинные воды (преимущественно до 200 м).

– вторичное поступление  $^{90}\text{Sr}$  с водами верхнего Днепра явилось более значимым источником загрязнения  $^{90}\text{Sr}$  воды Каховского водохранилища, СКК, Северо-Западного района и региона у Крымского побережья Чёрного моря, чем выпадение этого радионуклида с атмосферными осадками. По нашим расчётам концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде увеличилась по сравнению с доаварийным уровнем: в 70 раз в воде Каховского водохранилища, в 77 раз в воде СКК, в 22 раза в воде района Днепровско-Бугского лимана и в 7.6 раз в районе у Крымского побережья Чёрного моря.

Как известно [11], одной из возможностей прогнозирования является метод экстраполяции аппроксимирующих функций. С целью поиска адекватных функций мы рассмотрели особенности изменения средней концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя, на основании собственных и литературных [3, 6, 7, 9–10] данных, на графике с логарифмическим масштабом по оси ординат (рисунок 1).

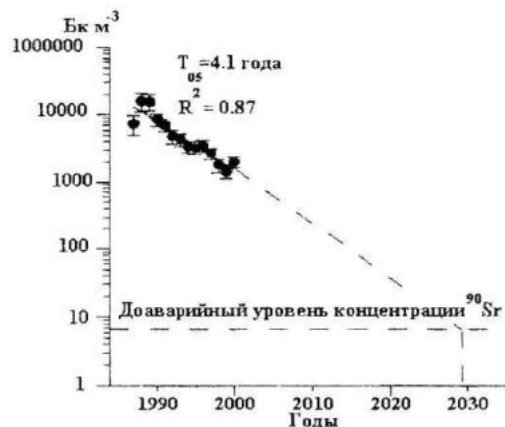


Рисунок 1 – Динамика и прогнозная оценка изменения среднегодовой концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя ЧАЭС

На рисунке 1 показано, что в рассмотренном масштабе данные удовлетворительно распределяются вдоль прямой линии (коэффициент детерминации  $R^2$  равен 0.87), что свидетельствует о достаточной степени адекватности описания этого процесса экспоненциальной функцией. При этом период уменьшения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  вдвое ( $T_{05}$ ) является постоянной времени экспоненциальных функций и может использоваться в качестве параметра для целей прогнозирования методом экстраполяции аппроксимирующей прямой.

Данный подход к изучению и анализу процесса динамики концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя ЧАЭС применялся нами, с учётом адекватности, при анализе аналогичных процессов для всех исследуемых водоёмов.

Получено, что дальнейшее экспоненциальное уменьшение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в различных водоёмах происходило с  $T_{05}$ : 4.1 года для водоёма-охладителя ЧАЭС, 6.1 года – для Киевского водохранилища; 5.7 года – для Каховского водохранилища, 7.6 года для СКК, от 7.3 года до 24.3 года в воде различных районов Чёрного моря.

К 1999–2003 гг. концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского водохранилища, Каховского водохранилища и СКК в 300.0, 14.7, 21.7 и 22.0 раза, соответственно, превышала доаварийный уровень. Необходимо отметить, что практически во всех регионах Чёрного моря, за исключением района Днепровско-Бугского лимана, концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде уже снизилась к доаварийному уровню (рисунок 2, таблица 1).

Определено, что прогнозируемое уменьшение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде водоёма-охладителя и Киевского водохранилища к доаварийному уровню будет продолжаться в течение 44 лет, Каховского водохранилища – 36 лет, СКК – 44.0 года и Днепровско-Бугском лимане Чёрного моря – 39 лет.

Определено, что с 1986 по 2006 гг. во всех исследуемых водоёмах, кроме водоёма-охладителя ЧАЭС (в период 1986–1997 гг.), концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в воде не превышала ПДК, принятых в Украине в 1991 и 1997 (дополнения 2000, 2002, 2005) годах. К 2004 году концентрация  $^{90}\text{Sr}$  [13] в воде водоёма-охладителя составляла 80 % от ПДК.

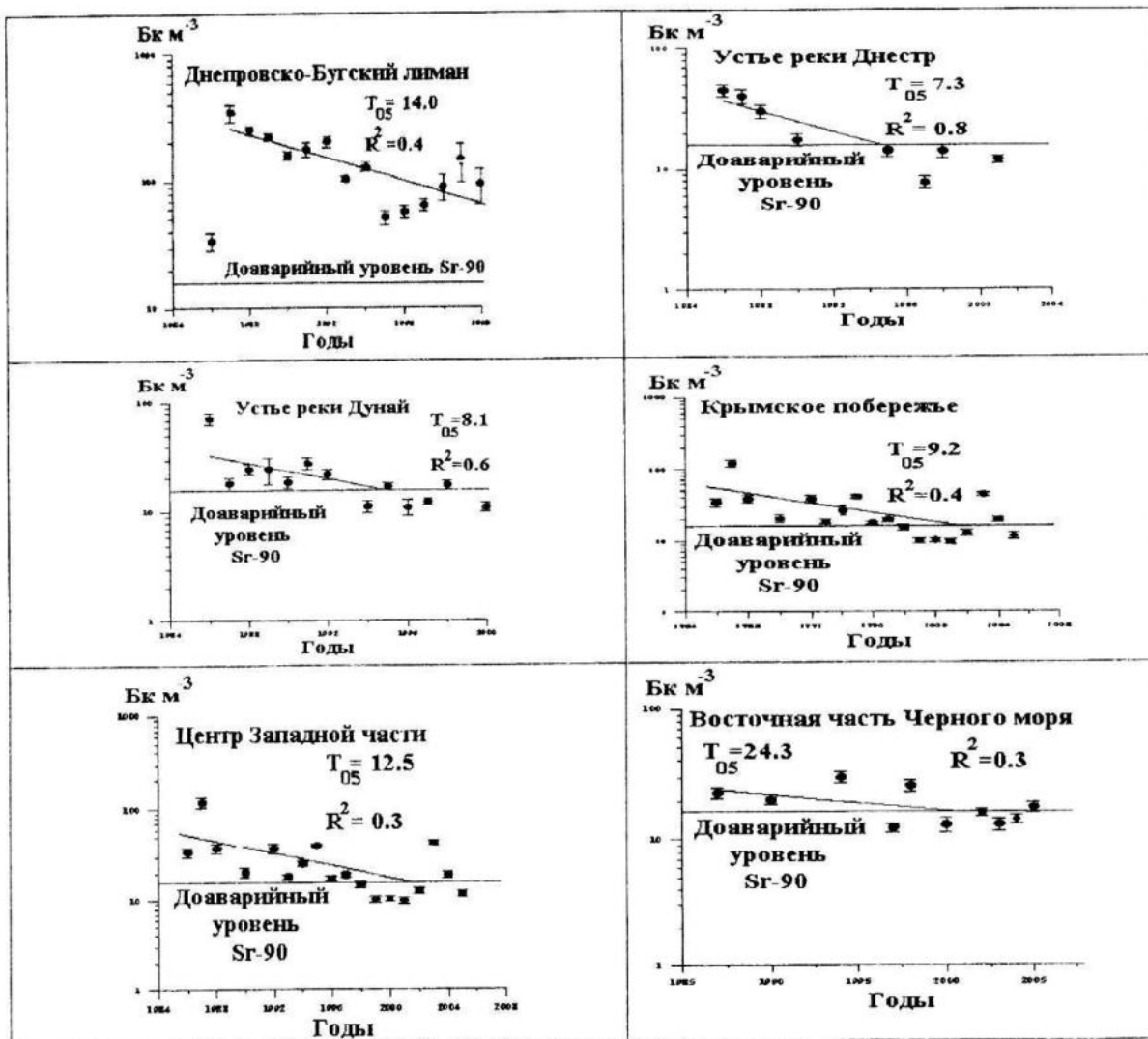


Рисунок 2 – Изменение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде различных регионов Чёрного моря за период 1986–2005 гг.

Таблица 1 – Период уменьшения вдвое ( $T_{05}$ ) и полный период снижения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  к доаварийному уровню ( $T$ ) в воде Чёрного моря

Районы акватории Чёрного моря	$T_{05}$ , годы	$T$ , годы	Отношение периода полураспада радионуклида к $T_{05}$	Время снижения концентрации $^{90}\text{Sr}$ к доаварийному уровню (год)
Днепроовско-Бугский лиман	14.0	39.0	2.1	2025
Устье реки Днестр	7.3	4.0	3.9	1990
Устье реки Дунай	8.1	8.0	3.6	1994
Район у побережья Крыма	9.2	16.0	3.1	2002
Западная часть	12.5	17.0	2.3	2003
Верхнее-Босфорское течение	13.5	9.0	2.1	1995
Восточная часть	24.3	17.0	1.2	2003

Оценены средние потоки биогеохимического самоочищения воды водоёмов от поставарийного  $^{90}\text{Sr}$ : для водоёма-охладителя – 0.9 ТБк, для Киевского и Каховского водохранилищ – 0.3 и 0.5 ТБк, соответственно, а СКК – 80.9 ГБк в год. Полученные нами прогноз и оценка балансовых компонентов для  $^{90}\text{Sr}$  в воде Чёрного моря показали, что через 39 лет (к 2025 г.) в экосистеме моря общее содержание радионуклида составит  $1946.1 \pm 231.4$  ТБк, что на 446.1 ТБк превышает доаварийный уровень. Вероятно, это количество  $^{90}\text{Sr}$  перераспределится между биотическими и абиотическими компонентами Чёрного моря.

**Заключение.** Таким образом, получено, что тенденции изменения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в воде изучаемых водоёмов во времени, с достаточной степенью адекватности описываются экспоненциальными функциями. Определены периоды уменьшения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  вдвое: 4.1–24.3 года. Прогнозируемое время снижения концентрации  $^{90}\text{Sr}$  до предаварийных уровней составит: в воде пресных водоёмов и северо-западной части Чёрного моря – 39–44 года с момента аварии.

Установлено, что, отражая степень удаления от ЧАЭС, в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского водохранилища, Каховского водохранилища, Северо-Крымского канала и Чёрного моря в среднем к 2006 г. сформировались следующие соотношения концентраций  $^{90}\text{Sr}$ : 100 : 20 : 3 : 3 : 0.6 (%), соответственно.

## Л и т е р а т у р а

1. Ликвидация последствий. Современное состояние и взгляд в будущее. 2. Радиоактивное загрязнение окружающей среды // 20 лет Чернобыльской катастрофы. Взгляд в будущее: Национальный доклад Украины / Ред.-техн. группа Л.В. Перепелятникова, Т.Н. Иванова, Л.В. Калининко [и др.]. – К.: Аттика, 2006. – С. 11–32.

2. Модель крупномасштабного загрязнения Чёрного моря долгоживущими радионуклидами цезием-137 и стронцием-90 в результате аварии на ЧАЭС / В.Н. Егоров, Г.Г. Поликарпов, Л.Г. Кулебакина [и др.] // Вод. ресурсы. – 1993. – Т. 20, № 3. – С. 326–330.

3. Мониторинг радиоактивного загрязнения поверхностных и подземных вод после Чернобыльской аварии: [монография] / О.В. Войцехович, В.М. Шестопалов, А.С. Скальский [и др.] – К.: Укр. науч.-исслед. гидрометеорол. Ин-т; Ин-т геол. наук НАНУ, 2001. – 148 с.

4. Аналитическая химия стронция / [Н.С. Полуэтков, В.Т. Мищенко, Л.И. Кононенко, С.В. Бельтюкова.]; гл. ред. Ю.А. Золотов. – М.: Наука, 1978. – 223 с.

5. Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials: analytical methods / В.К. Harvey, R.D. Ibbett, M.B. Lovett, K.J. Williams. – Lowestoft: S. a., 1989. – 33 p.

6. Д.І. Гудков 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.

7. Радіаційний моніторинг зони відчуження / В.В. Деревець, А.К. Сухоручкін, С.В. Казаков [та інш.] // Бюл. екологічного стану зони відчуження. – 1997. – Вип. 4 (9). – С. 8–28.

8. Радиоактивное и химическое загрязнение Днестра 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.

9. Радиогеоэкология водных объектов зоны влияния аварии на Чернобыльской АЭС: [монография] / под общ. ред. О.В. Войцеховича. – К.: Чернобыль-интеринформ, 1997. – Т. 1. Мониторинг радиоактивного загрязнения природных вод Украины (обзор исследований, выполненных за период 1986–1996 гг.) / [О.В. Войцехович, В.В. Канивец, Э.Г. Тертышник и др.] – 1997. – 308 с.

10. I.I. Kryshev Radioactive contamination of aquatic ecosystems following the Chernobyl accident / I.I. Kryshev // J. Environ. Radioactivity. – 1995. – Vol. 27, № 3. – P. 207–220.

11. В.В. Налимов Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.