

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ АВАРИИ НА ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ ДЛЯ ВОДОЁМОВ УКРАИНЫ (ОТ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ ЧАЭС ДО ЧЕРНОГО МОРЯ) В ПЕРИОД 1986-2008 гг.

В результате наших исследований впервые на основе комплексного анализа многолетних натуральных наблюдений получены зависимости, описывающие закономерности изменения во времени концентрации и перераспределения ^{90}Sr в компонентах (вода, гидробионты) как пресных водоёмов (водоём-охладитель ЧАЭС, Киевское и Каховское водохранилища, Северо-Крымский канал (СКК)), так и Чёрного моря, имеющих различную степень удалённости от аварийной ЧАЭС. Впервые получены прогнозы времени уменьшения концентрации ^{90}Sr в биотических и абиотических компонентах водных экосистем к доаварийным уровням и сделан их сравнительный анализ.

Ключевые слова: водоём-охладитель ЧАЭС, Киевское и Каховское водохранилища, Северо-Крымский канал, Чёрное море, вода, гидробионты, стронций-90, перераспределение, миграция, прогноз.

У результаті наших досліджень уперше на основі комплексного аналізу багаторічних натурних спостережень отримані залежності, що описують закономірності зміни в часі концентрації і перерозподілу ^{90}Sr у компонентах (вода, гідробіонти) як прісних водойм (водойма-охолоджувач ЧАЕС, Київське і Каховське водосховища, Північно-Кримський канал (ПКК)), так і Чорного моря, що в різній мірі віддалені від аварійної ЧАЕС. Методом прогнозування вперше визначені періоди часу зменшення концентрацій ^{90}Sr у біотичних і абіотичних компонентах водяних екосистем до доаварійних рівнів і зроблено їх порівняльний аналіз.

Ключові слова: водойма-охолоджувач ЧАЕС, Київське і Каховське водосховища, Північно-Кримський канал, Чорне море, вода, гідробіонти, стронцій-90, перерозподіл, міграція, прогноз.

As a result of our investigations for the first time on the basis of the complex analysis of long-term natural observation the dependences describing laws of change in time of ^{90}Sr concentration and redistribution in components (water, hydrobionts) as fresh water reservoirs (the Chernobyl NPP pond-cooler, Kiev and Kakhovskoe reservoirs, Northern-Crimean channel (NCC)) and the Black Sea, having a various degree of remoteness from place of the Chernobyl NPP accident are received. Forecasts of time of reduction of ^{90}Sr concentration in biotic and abiotic components of water ecosystems to before accident levels for the first time are received and their comparative analysis is made.

Key words: the Chernobyl NPP pond-cooler, the Kiev and Kakhovskoe reservoirs, the Northern-Crimean channel, the Black Sea, water, hydrobionts, strontium-90, redistribution, migration, forecast.

Введение

Авария на Чернобыльской атомной электростанции (ЧАЭС), произошедшая 26 апреля 1986 г., явилась крупнейшей ядерной катастрофой XX века [1; 2]. В результате чего в окружающую среду попало до 7,4 ПБк ^{90}Sr , что на 2 порядка превышало выброс этого радионуклида после бомбардировки Хиросимы (6-9 августа 1945 г.) [3]. Приоритетность исследований, начатых после аварии на ЧАЭС профильными ведомственными и научными учреждениями, относилась и к такому экологически опасному источнику поставарийного радиоактивного загрязнения среды, как радионуклид ^{90}Sr . Отмечено, что ^{90}Sr входит в число наиболее экологически токсичных поставарийных радионуклидов, так как обладает высокой растворимостью, а отсюда – и миграционной способностью. В природных средах находится в водорастворимой, преимущественно катионной, форме, имеет значительный период полураспада (28,78 года), высокоэнергетический дочерний продукт ^{90}Y (2,25 МэВ) [4]. Является химическим аналогом кальция, способен замещать его, прочно удерживается и медленно выводится из живого организма [5].

С учётом степени изученности проблемы, актуальным явилось выполнить цельное сравнительное радиоэкологическое исследование перераспределения поставарийного ^{90}Sr по компонентам водных экосистем и особенностей его миграции от источника аварии вплоть до низовья Днестра и, главным образом, включая Чёрное море. В связи с этим, целью наших исследований было: определить тенденции динамики концентрации и миграции ^{90}Sr по компонентам водных экосистем после аварии на ЧАЭС, спрогнозировать масштабы времени уменьшения концентрации ^{90}Sr к доаварийному уровню в гидробионтах и воде пресных и морского водоёмов Украины.

Материалы и методы

Объектами исследования служили вода и гидробионты водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, Северо-Крымского канала (СКК) и акватории Чёрного моря в период 1986-2008 гг. Общее количество проанализированных проб – 2044. Рассматривались 6 видов водорослей, 16 видов высших водных растений, 8 видов моллюсков, 29 видов рыб. Определения концентрации ^{90}Sr в исследуемых объектах проводились по общепринятой, метрологически тестированной радиохимической методике определения ^{90}Sr в природных пробах, радиометрии и математической обработки данных [6-8]. Относительная погрешность полученных результатов не превышала 20 %. Контроль за качеством используемой методики и получаемых результатов осуществлялся путём постоянного участия в международной интеркалибрации под эгидой МАГАТЭ. Полученные результаты опубликованы в отчетах МАГАТЭ с пометкой «приняты, как достоверные» [9]. Для сравнения также анализировались литературные данные и данные, представленные в Базе данных ОРХБ ИнБЮМ [10].

Результаты и их обсуждение

Закономерности динамики и оценка прогнозов изменения среднегодовой концентрации ^{90}Sr в воде были определены нами при изучении этих процессов в водоёме-охладителе ЧАЭС.

Как показано на рисунке 1, представленном в линейном масштабе, непосредственно после аварии в 1986 г. наблюдалось резкое (до $40,0 \pm 27,0$ кБк·м⁻³) увеличение концентрации ^{90}Sr , что почти в 10-20 раз превысило ПДК [11, 12] и в 100 тысяч раз доаварийный уровень [13] концентрации этого радионуклида в воде водоёма. В дальнейшем концентрация ^{90}Sr уменьшалась с некоторым колебанием, связанным со вторичным поступлением радионуклида в воду экосистемы [14]. К 1998 году концентрация ^{90}Sr уменьшилась к уровню ПДК, но к 2004 году превышала доаварийный уровень в 300 раз.

Представлением этих же натуральных данных на графике с логарифмическим масштабом по оси ординат (рис. 2) получено, что этот процесс с достаточной степенью адекватности (коэффициент детерминации R^2 равен 0,87) удовлетворительно описывается экспоненциальной функцией вида:

$$C = C_0 \times \exp(-pt),$$

где C – концентрация ^{90}Sr в момент времени t ;

C_0 – концентрация ^{90}Sr в момент времени t_0 – начальный момент времени ($t_0 = 0$ на дату 26.04.1986 г.);

p – параметр ($p = 0,693/t_{05}$, где t_{05} – период снижения концентрации радионуклида вдвое).

Как известно, t_{05} (T_{05}) является постоянной времени экспоненциальных функций на всем интервале времени их рассмотрения и может использоваться в качестве параметра для целей прогнозирования. Постоянный параметр этой функции позволяет в нашем случае определить период постоянного уменьшения концентрации ^{90}Sr вдвое (T_{05}) в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, где $T_{05} = 4,1$ года.

Одной из возможностей прогнозирования [15] является метод экстраполяции аппроксимирующих функций, а объективность прогнозных характеристик определяется качеством подбора этих функций, а также динамическими свойствами объекта прогнозирования. Экстраполяция тренда аппроксимирующей функции к значению доаварийной концентрации ^{90}Sr (рис. 2) позволило сделать прогнозную оценку, что концентрация ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС уменьшится до доаварийного уровня к 2030 году.

Таким образом, в результате воздействия гидрологических и биогеохимических процессов и радиоактивного распада время пребывания чернобыльского ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС составит приблизительно 30 % от времени существования 97 % атомов этих радионуклидов [9].

Рассмотренные подходы к изучению и анализу процесса динамики изменения содержания ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС применялись нами при анализе аналогичных процессов для всех исследуемых водоёмов с учётом адекватности их применения.

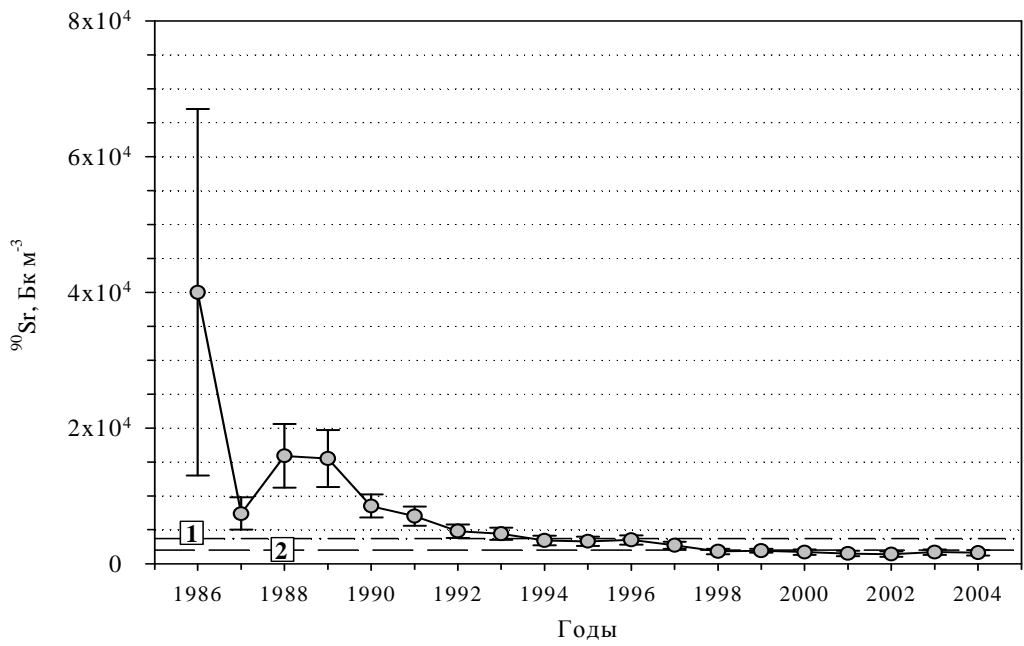


Рис. 1. Динамика среднегодовых концентраций ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС в 1986-2004 гг. 1 – ПДК для питьевой воды (ВДУ-91); 2 – ПДК для питьевой воды: (ДР-97)

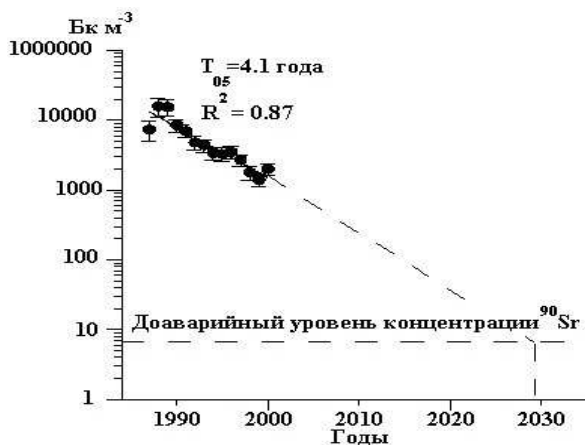


Рис. 2. Динамика и прогнозная оценка изменения среднегодовой концентрации ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС

На основании полученных результатов были определены следующие закономерности поэтапной реакции водной среды водоёмов Украины на загрязнение ^{90}Sr после аварии на ЧАЭС:

- первичное повышение концентрации ^{90}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;
- последующее резкое, в течение 1-2 лет, снижение концентрации ^{90}Sr за счёт миграции радионуклида в ниже расположенные водоёмы, перераспределения по компонентами экосистем, а в Чёрном море за счёт перемешивания в слое 0-50 м и миграции ^{90}Sr в глубинные воды (преимущественно до 200 м);

- вторичное поступление ^{90}Sr с водами верхнего Днепра явилось более значимым источником загрязнения ^{90}Sr воды Каховского водохранилища (рис. 3), СКК, Северо-Западного района, района Крымского побережья Чёрного моря, чем выпадение радионуклида с атмосферными осадками.

По нашим расчётам вторичное поступление ^{90}Sr с водами верхнего Днепра увеличили концентрацию этого радионуклида 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 Крымского побережья Чёрного моря; наблюдалось дальнейшее экспоненциальное уменьшение концентрации ^{90}Sr в различных водоёмах с $T_{0.5}$: 4,1 г. – для водоёма-охладителя ЧАЭС, 6,1 г. – для Киевского водохранилища; 5,7 г. – для Каховского водохранилища, 7,6 г. для СКК, от 7,3 до 24,3 г. в воде различных районов Чёрного моря.

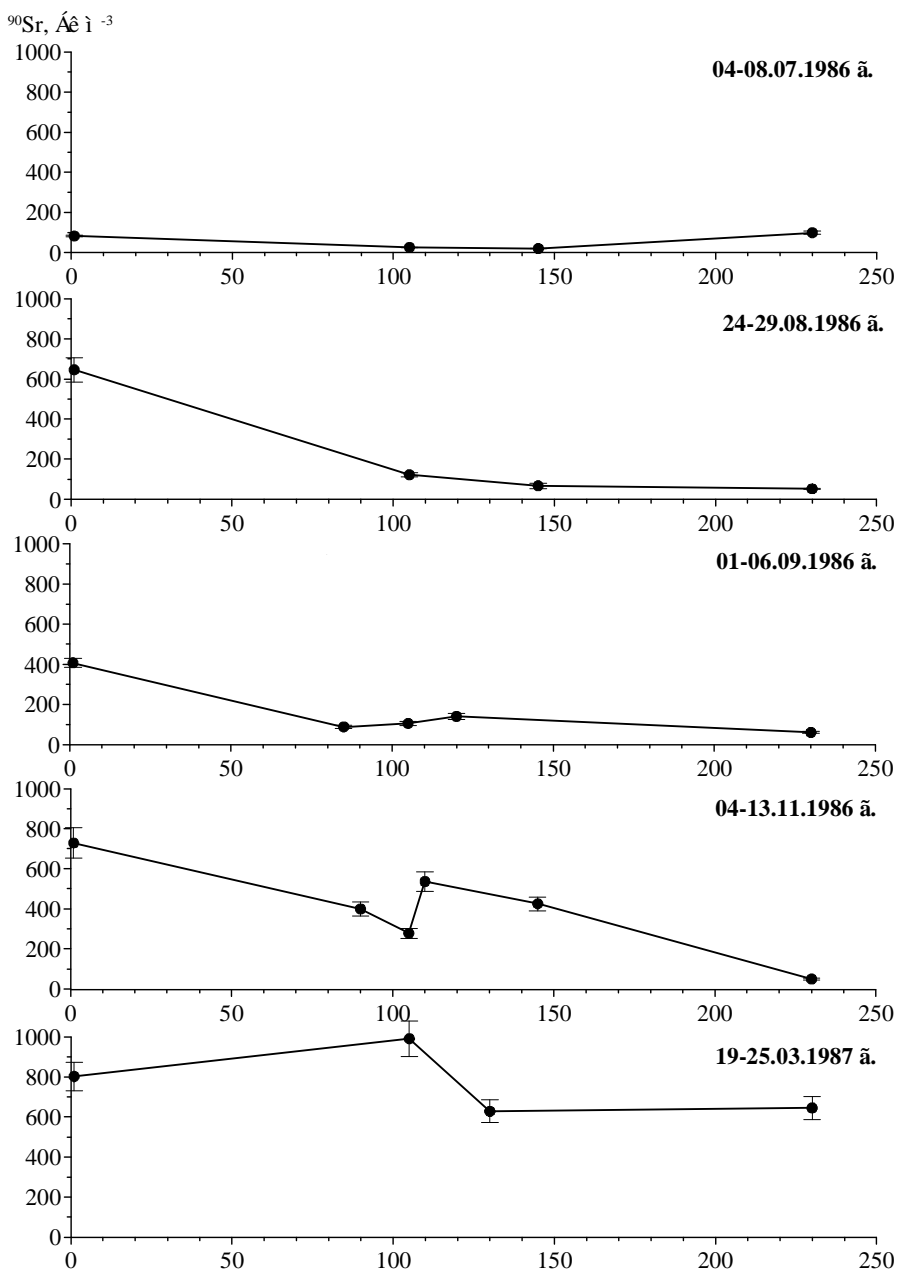


Рис. 3. Динамика концентрации ^{90}Sr в воде Каховского водохранилища в 1986-1987 гг. [10]

К 1999-2004 гг. концентрация ^{90}Sr в воде водоёма-охладителя ЧАЭС, Киевского и Каховского водохранилищ, СКК в 300, 14,7, 21,7 и 22,0 раза, соответственно, превышала доаварийный уровень. Во всех районах Чёрного моря, за исключением Днепровско-Бугского лимана, концентрация ^{90}Sr в воде уже снизилась к доаварийному уровню. Нами определено, что прогнозируемое уменьшение концентрации ^{90}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, Днепровско-Бугском лимане Чёрного моря – 39 лет. С 1986 по 2008 гг. во всех исследуемых водоёмах, кроме водоёма-охладителя ЧАЭС (в период 1986-1997 гг.), концентрация ^{90}Sr в воде не превышала ПДК, принятых в Украине.

Была проанализирована видоспецифичность накопления ^{90}Sr гидробионтами из исследуемых

водоёмов. Выделены индикаторные виды гидробионтов, для которых характерны общие закономерности изменения концентрации ^{90}Sr в биотических компонентах экосистем. Для пресных водоёмов такими индикаторами являются *Potamogeton perfoliatus* L. (высшие водные растения), *Dreissena bugensis* (Andr.) и *Unio pictorum* L. (моллюски), *Blicca bjoerkna* (L.) (рыбы), а для Чёрного моря – *Cystoseira crinita* (Desf.) Vory (водоросли), *Mytilus galloprovincialis* Lamark (моллюски), *Psetta maxima maeotica* (Pallas) и *Merlangius merlangus euxinus* (Nordmann) (рыбы). В таблицах 1, 2, 3, соответственно, представлены основные параметры концентрирования ^{90}Sr водорослями и высшими водными растениями, моллюсками, рыбами из исследуемых водоёмов в период 1986-2008 гг. Получено (табл. 1-3), что тенденции изменения концентрации ^{90}Sr в гидробионтах во времени, с достаточной степенью адекватности описываются

экспоненциальными функциями. Определены периоды уменьшения концентрации ^{90}Sr вдвое: в водорослях и высших водных растениях 3,6-7,7; моллюсках 2,4-6,7 и рыбах 7,8-12,9 года. Прогнозируемое время снижения концентрации ^{90}Sr до

предаврийных уровней составит: в пресноводных моллюсках, рыбах из всех исследуемых водоёмов, в высших водных растениях из водоёма-охладителя ЧАЭС и Киевского водохранилища – 25-73 года с момента аварии.

Таблица 1

Основные параметры концентрирования ^{90}Sr водорослями и высшими водными растениями в период 1986-2008 гг.

Водоём	Диапазон концентраций ^{90}Sr , Бк кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	K_H	Периоды уменьшения концентрации ^{90}Sr вдвое, (T_{05})	Отношение периода полураспада ^{90}Sr к T_{05} , (раз)	Время достижения доаварийных уровней концентрации ^{90}Sr (год)
Водоём-охладитель ЧАЭС	213,0-15000,0	58,6-375,0	3,57	8,7	2024
Киевское водохранилище	78,3-730,0	71,2-1025,0	7,76	4,0	2038
Каховское водохранилище и СКК	2,4-24,9	12,0-82,5	4,90	6,0	1997
Чёрное море	1,5-13,5	83,3-309,0	4,90	6,0	1988

Таблица 2

Основные параметры концентрирования ^{90}Sr моллюсками в период 1986-2008 гг.

Водоём	Диапазон концентраций ^{90}Sr , Бк кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	K_H	Периоды уменьшения концентрации ^{90}Sr вдвое, (T_{05})	Отношение периода полураспада ^{90}Sr к T_{05} , (раз)	Время достижения доаварийных уровней концентрации ^{90}Sr (год)
Водоём-охладитель ЧАЭС	213,0-15000,0	58,6-375,0	3,57	8,7	2024
Киевское водохранилище	78,3-730,0	71,2-1025,0	7,76	4,0	2038
Каховское водохранилище и СКК	2,4-24,9	12,0-82,5	4,90	6,0	1997
Чёрное море	1,5-13,5	83,3-309,0	4,90	6,0	1988

Установлено, что диапазон изменения коэффициентов накопления ^{90}Sr для одних и тех же таксономических групп гидробионтов мало зависит от удалённости водоёма от места аварии (табл. 1-3). Коэффициенты накопления ^{90}Sr в водорослях, высших водных растениях и моллюсках составили

$n \cdot 10^1 - n \cdot 10^3$, в рыбах – $n \cdot 10^0 - n \cdot 10^2$ единиц, что совпадало в пределах вариабельности наблюдений с известными из литературы [6] экспериментальными уровнями и значениями коэффициентов накопления для других водоёмов.

Таблица 3

Основные параметры концентрирования ^{90}Sr рыбами в период 1986-2007 гг.

Водоём	Диапазон концентраций ^{90}Sr , Бк кг ⁻¹ воздушно-сухой массы	K_H	Периоды уменьшения концентрации ^{90}Sr вдвое, (T_{05})	Отношение периода полураспада ^{90}Sr к T_{05} , (раз)	Время достижения доаварийных уровней концентрации ^{90}Sr (год)
Водоём-охладитель ЧАЭС	2133,0-40000,0	1255,0-25000,0	3,76	7,7	2030
Киевское водохранилище	53,0-1200,0	48,8-3000,0	2,41	12,0	2010
Каховское водохранилище и СКК	47,6-329,3	201,8-1180,3	6,42	4,8	2025
Чёрное море	1,3-12,5	67,4-511,3	6,70	4,3	1991

Полученные нами результаты позволяют сделать обобщающий вывод, что тенденции изменения концентрации ^{90}Sr в компонентах исследуемых водоёмов инвариантны по отношению к концентрации радионуклида в воде. Используемые подходы, сделанный прогноз и полученные

закономерности распределения и миграции ^{90}Sr в компонентах пресноводных экосистем и Чёрного моря после аварии на ЧАЭС имеют практическое значение для целей прогнозирования последствий при возможных аварийных ситуациях в изученном регионе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Израэль Ю.А. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 296 с.
2. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля / [Апплби Л.Дж., Девелл Л., Мишра Ю.К. и др.] под ред. Ф. Уорнера и Р. Харрисона; [пер. с англ. Д.В. Гречук, Н.П. Григорьева, Т.В. Никитина и др.]. – М.: Мир, 1999. – 512 с.
3. Gudiksen P.H. Chernobyl source term, atmospheric dispersion and dose estimation / P.H. Gudiksen, T.F. Harvey, R. Lange // J. Health Phys. – 1989. – Vol. 57, № 5. – P. 697-705.
4. Полуэтков Н.С., Мищенко В.Т., Кононенко Л.И., Бельтюкова С.В. Аналитическая химия стронция. – М.: Наука, 1978. – 223 с.
5. Романенко В.Д. Основы гидроэкологии: учебник для студентов высш. учеб. заведений / В.Д. Романенко. – К.: Генеза, 2004. – 664 с.
6. Поликарпов Г.Г. Радиоэкология морских организмов. – М.: Атомиздат, 1964. – 295 с.
7. Harvey B.K., Ibbett R.D., Lovett M.B., Williams K.J. Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials // Aquatic Environmental Protection: Analytical Methods. – Lowestoft. – 1989. – 33 p.
8. Instrument description «Quantulus 1220»//Instrument Manual LKB Wallac, Pharmacia Wallac Oy. – June 1989. – 350 p.
9. IAEA. (International Atomic Energy Agency). Analytical Quality Control Services. Reference Materials: catalogue 2004-2005. – Vienna, Austria: IAEA, 2004. – 121 p.
10. База данных ОРХБ (за период 1964-2008 гг.): Вода. Гидробионты. Донные отложения [Электронный ресурс]; разработана Д.Б. Евтушенко, В.Н. Егоровым, 1992. – Севастополь: ОРХБ, ИнБЮМ, 2006. – Систем. требования: Pentium-266; 32 Mb RAM; Windows 98; программный пакет Paradox. – Название с титул. экрана.
11. Нормы радиационной безопасности Украины. Дополнение: Радиационная защита от источников потенциального облучения (НРБУ-97/Д-2000); ДНАОП 0.03-3.24-97 (ДГН 6.6.1-6.5.061-98). – [Заменяет: НРБ-76/87 Нормы радіаційної безпеки № 4392-87] – К.: МОЗ України, 2000. – 121 с. – (Нормативно-директивний документ МОЗ України).
12. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України: ОСПУ-2005. – [Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 20 травня 2005 р. За № 552/10832]. – К.: Міністерство охорони здоров'я України, Радіаційна гігієна, 2005. – 112 с. – (Нормативно-директивний документ МОЗ України).
13. Динамика радиоэкологических показателей загрязнения гидробионтов в зоне влияния ЧАЭС / О.Л. Зарубин, И.Н. Крышев, Т.Г. Сазыкина [и др.] // Радиационные аспекты Чернобыльской аварии: (сборник в двух частях): Ч. II. Экологические и радиобиологические проблемы. Экологические и радиобиологические проблемы. – К.: АН УССР, 1989. – С. 16-28.
14. Войцехович О.В. Половодье на реке Припять в 1999 г. и анализ формирования радиоактивного загрязнения днепровской водной системы / О.В. Войцехович // Тр. УкрНИГМИ. – 1999. – Вып. 247. – С. 159-170.
15. Налимов В.В. Теория эксперимента / В.В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.

Рецензенти: Лазоренко Г.Е., кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Отдела радиационной и химической биологии ИнБЮМ НАН Украины, г. Севастополь;
Егоров В.Н., чл.-корр. НАН Украины, профессор, д.б.н., Отдел радиационной и химической биологии ИнБЮМ НАН Украины, г. Севастополь.

© Мирзоева Н.Ю., 2010

Стаття надійшла до редколегії 24.04.2010 р.