

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЕ КАНЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА
ПОСЛЕ АВАРИИ НА ЧАЭС 1986 г.О. Л. Зарубин¹, В. В. Канивец²¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*² *Украинский научно-исследовательский гидрометеорологический институт, Киев*

В 1986 - 2003 гг. изучалось содержание радионуклидов в воде Каневского водохранилища р. Днепр. В 1986 г. зарегистрировано 15 гамма-излучающих радионуклидов с максимальной суммарной активностью 3 мая – 6 кБк/л. Первоначальное радионуклидное загрязнение акватории Каневского водохранилища произошло через 4 - 6 сут после аварии на ЧАЭС и формировалось аэрозольными выпадениями на его акваторию. Через 10 - 20 сут после аварии на ЧАЭС радионуклиды начали поступать в Каневское водохранилище с водными массами северных территорий водосбора. С 1987 г. радиоактивность воды определяли ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Их содержание, в основном, определялось поступлением “грязной” воды из Киевского водохранилища.

Введение

В результате первых оценок последствий аварии на ЧАЭС стало понятно, что значительная часть радионуклидов (РН) попала на зеркало водоемов и пойменные территории. Особенно сильно была загрязнена пойма р. Припять. В дальнейшем, в результате весенних паводков и половодий, смытые с водосбора РН поступали в р. Припять и выносились ею в Киевское водохранилище – самое верхнее в каскаде днепровских водохранилищ.

Во время прохождения водных масс по Киевскому водохранилищу содержание РН в воде снижалось за счет оседания загрязненных речных наносов Припяти и верхнего Днепра, сорбции растворенных РН “чистым” материалом берегового размыва и последующим оседанием этого материала на дно [1].

Киев расположен в верхней части Каневского водохранилища (КВ); здесь же расположены его основные источники питьевой воды - Днепровский и Деснянский водозаборы, что обусловило необходимость изучения содержания РН в КВ.

Материал и методика исследований

На акватории КВ в 1986 г., начиная со 2 мая, регулярно отбирались пробы воды севернее Киева в районе Днепровской (ДнВС) и Деснянской (ДесВС) водозаборных станций (рис. 1). В мае - июне отбирали по 2 - 4 пробы в сутки; в июле - сентябре по 1 - 2, в августе - декабре по одной пробе в 1 - 5 сут. На основе результатов измерений содержания РН в воде рек Днепр и Десна было рассчитано содержание РН в воде верхней части КВ (на территории Киева) после смешивания водных масс данных рек. При расчетах учитывалась удельная радиоактивность РН в воде и объем поступающей в КВ воды, который составляет для Днепра около 75 %; соответственно для Десны – около 25 %. Расчетные данные в дальнейшем были полностью подтверждены отборами проб воды непосредственно в Киеве. (В 1986 г. в Киеве и ниже по течению на акватории КВ было отобрано 26 проб воды.)

Всего в 1986 г. было проанализировано около 500 проб воды КВ. Объем одной пробы составлял 500 – 2500 мл.

В 1986 г. в основном вода не фильтровалась. Проводились прямые измерения содержания гамма-излучающих РН методами гамма-спектрометрии с использованием германиевых детекторов типа ДГДК на базе Центра экологических проблем атомной энергетики Института ядерных исследований АН УССР. Время измерения образцов в зависимости от их активности составляло от 1800 до 28800 с. Относительная погрешность измерений активности РН в образцах, как правило, не превышала 20 %, обыкновенно составляя 8 - 12 %.

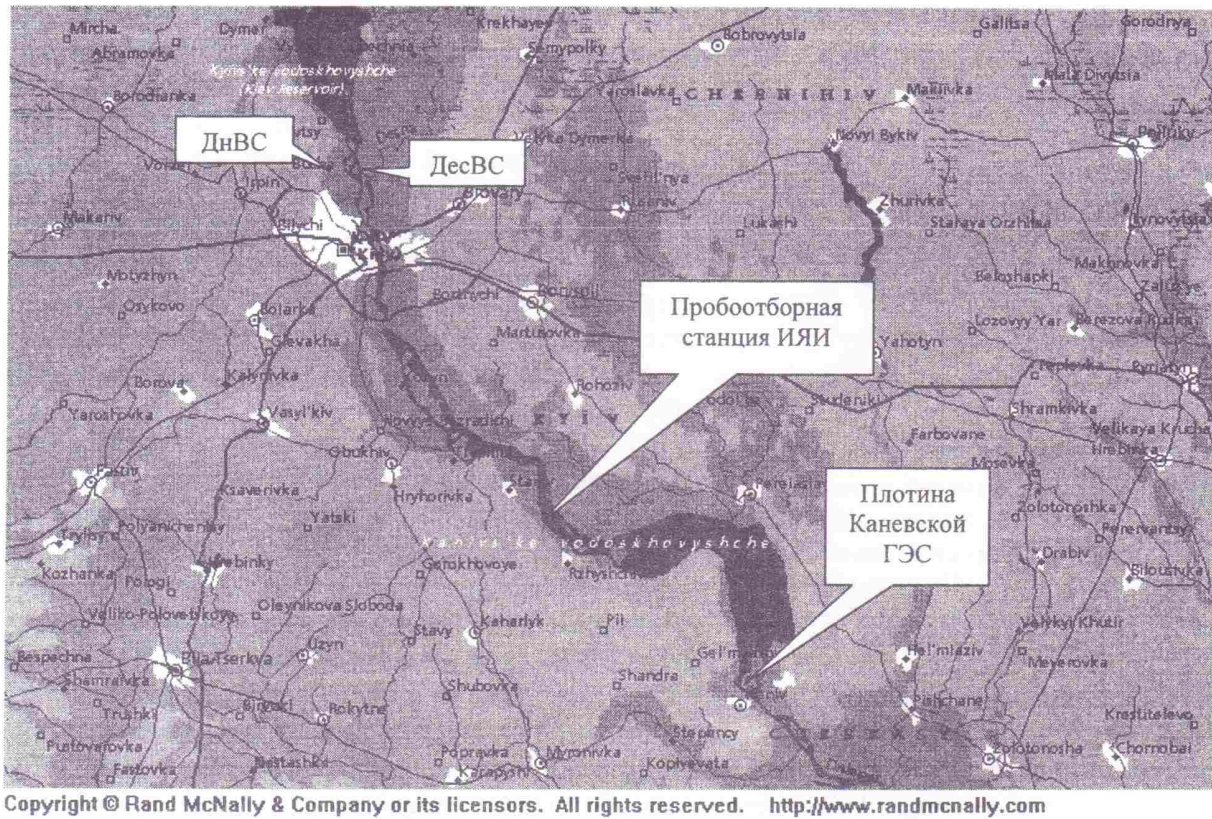


Рис. 1. Схема основных точек отбора проб воды КВ.

С 1987 г. для расчета среднегодовых концентраций активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде КВ использовались данные радиационного мониторинга, проводившегося Госгидрометом УССР, Киевводоканалом (только ^{90}Sr), УкрНИГМИ, НПО “Тайфун”, Госводхозом УССР (только ^{90}Sr). В 1987 - 2003 гг. на акватории КВ были продолжены отборы проб воды в районе ДнВС и ДесВС, а также в нижнем конце КВ возле плотины Каневской ГЭС около Канева.

Частота пробоотбора в разные периоды в различных точках наблюдений была разной. Так, на протяжении первой половины 1991 г. проводился ежедневный отбор проб в районе ДнВС, в то же время в районе Канева пробы отбирались не чаще трех раз в месяц (ежедекадно). В последние годы в районе ДнВС и ДесВС, которые расположены в верхней части водохранилища, частота отбора составляет три раза в месяц, в районе Канева – один раз в месяц.

В период 1986 - 1991 гг. объем одной пробы воды составлял 20 - 50 л. Фильтрация проб и изъятие растворенного ^{137}Cs проводилось соответственно работе [2].

С 1992 г. использовали пробоотборную систему “Мидия” (рис. 2), предназначенную для отбора проб воды и зависших взвесей путем осаждения взвесей на фильтре и дальнейшего изъятия ^{137}Cs из больших объемов воды на селективный сорбент непосредственно во время пробоотбора (“in-situ”). Вода с помощью погруженного вибрационного насоса шлангом подается последовательно на фильтровальную секцию с фильтрами, наполненный сорбентом абсорбер и расходомер. Проходя через всю систему, вода очищается от взвесей и растворенных РН и возвращается в процессе отбора назад в водоем. Таким образом, конечный результат пробоотбора – это порция фильтров с зависшими наносами и порция сорбента с изъятим из водного раствора ^{137}Cs , направляемых на гамма-спектрометрический анализ. Кроме того, в процессе отбора пробы часть воды, которая прошла через фильтры, накапливается в отдельной емкости для дальнейшего определения концентраций активности ^{90}Sr . Объем проб воды, из которого изымали зависшие наносы и растворенный ^{137}Cs , составлял 500 - 1300 л. Как фильтровальный элемент использовался комбинированный фильтр, который состоит из бумажного фильтра (подложка) и тканевого материала ФПП-15-1,5 (главный фильтр). Размер

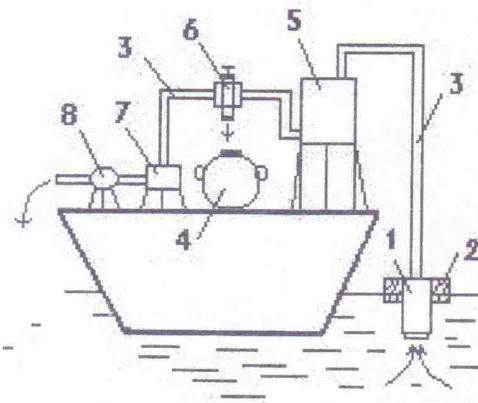


Рис. 2. Блок-схема пробоотборной системы "Мидия": 1 – вибрационный насос; 2 – поплавок; 3 – шланг; 4 – емкость для накопления фильтрата на анализ содержания ^{90}Sr ; 5 – фильтровальный блок; 6 – распределительный блок; 7 – контейнер с сорбентом; 8 – счетчик воды.

ления концентраций зависших наносов фильтры сушились до и после пробоотбора при температуре $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ до воздушно-сухого состояния. Затем фильтры и сорбент подвергались гамма-спектрометрическому анализу на разных моделях гамма-спектрометров. В УкрНИГМИ использовался спектрометр с HPGe детектором. Продолжительность измерений одной пробы в УкрНИГМИ составляла не менее 80000 с. Погрешность измерений (одна сигма) в большинстве случаев не превышала 10 %. Проводилась статистическая обработка результатов измерений.

Для радиохимического выделения ^{90}Sr использовали стандартную методику, которая базируется на его осаждении с карбонатами щелочных металлов, находящихся в воде в растворенном состоянии, затем растворение в кислоте и очищение от радионуклидов, мешающих определению ^{90}Sr [2, 4]. Конечное выделение ^{90}Sr проводилось по его дочернему продукту – ^{90}Y – после накопления последнего с носителем стабильного иттрия. Выход носителя стронция определялся атомно-адсорбционным методом.

Из вышеизложенного видно, что отбор, подготовка к измерениям и сами измерения, как правило, проводились по стандартным методикам. Все же следует отметить, что в настоящее время сложно оценить степень достоверности результатов измерений РН, полученных много лет назад в разных лабораториях.

Результаты исследований и их обсуждение

Содержание искусственных РН в воде КВ в 1986 г. На акватории КВ первые пробы воды были отобраны 2 - 3 мая 1986 г. в Киеве и ниже по течению Днепра в районе буя 101 (25 км от Киева) и буя 43 (60 км от Киева). Спектральный состав этих проб был практически одинаков, кроме относительно высокого по отношению к другим изотопам содержания ^{131}I в воде, отобранной около буя 43 (рис. 3 и 4). Суммарная радиоактивность воды, отобранной в районе буя 43 (г. Ржищев), была на порядок больше, чем в пробах из Киева и из района буя 101, и составила 6 кБк/л. Это самые высокие уровни содержания РН в воде КВ, зарегистрированные за время исследований.

По-видимому, такие высокие значения содержания РН в воде в районе г. Ржищев 3 мая 1986 г. можно объяснить метеорологическими условиями и сложным характером развития аварийной ситуации на ЧАЭС, что способствовало дополнительному аэрозольному поступлению РН именно на этот участок КВ и прилегающих левобережных территорий [5 - 7]. Подтверждением преимущественно аэрозольного пути поступления РН на акваторию КВ

задержанных наносов больше $0,45\text{ мк}$. Объем проб воды на анализ содержимого ^{90}Sr составлял 10 - 25 л.

Использование системы "Мидия" обеспечило значительный период усреднения пробы; в случае отбора пробы объемом 1 м^3 при скорости течения реки 1 м/с происходит усреднение колебаний концентраций РН и зависших наносов по струе длиной 6 - 8 км. Таким образом, исключается случайная погрешность, которая может быть значительной и неконтролируемой в случае отбора мгновенной пробы.

В пробах воды определялось содержимое зависших наносов (г/м^3), растворенного (Бк/м^3) и взвешенного (Бк/кг , Бк/м^3) ^{137}Cs , растворенного ^{90}Sr (Бк/м^3). Определение ^{90}Sr на взвесах не проводилось, так как предыдущими исследованиями было установлено, что больше 99 % ^{90}Sr находится в растворимом состоянии [3]. Для определения

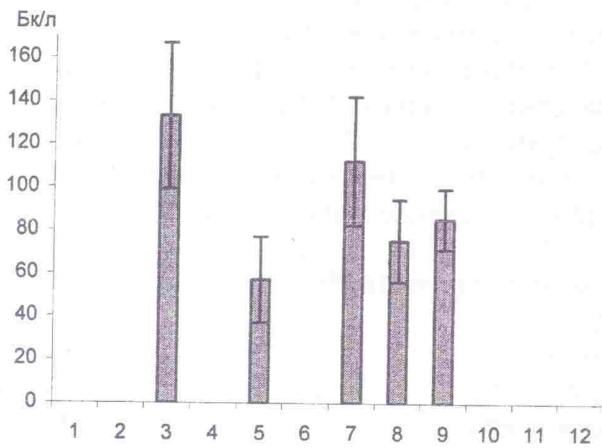


Рис. 3. Содержание радионуклидов 2 мая 1986 г. в воде КВ в районе буя 101 (Бк/л).

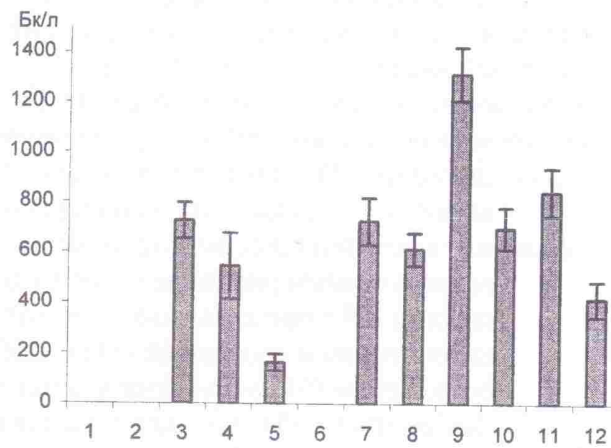


Рис. 4. Содержание радионуклидов 3 мая 1986 г. в воде КВ в районе буя 43 (Бк/л).

1 - ^{137}Cs ; 2 - ^{134}Cs ; 3 - ^{141}Ce ; 4 - ^{144}Ce ; 5 - ^{103}Ru ; 6 - ^{106}Ru ; 7 - ^{95}Zr ; 8 - ^{95}Nb ; 9 - ^{131}I ; 10 - $^{140}\text{Ba}+^{140}\text{La}$; 11 - ^{132}Te ; 12 - ^{239}Np .

в районе г. Ржищев (состояние на 3 мая 1986 г.) служат высокие уровни содержания РН в почве и хвое сосны на левом берегу на траверзе отбора пробы воды. Несмотря на большие различия уровней содержания РН в этих пробах, спектры содержания РН в них, в основном, схожи, за исключением повышенного (по сравнению с другими РН) содержания ^{131}I в хвое сосны (рис. 5 и 6).

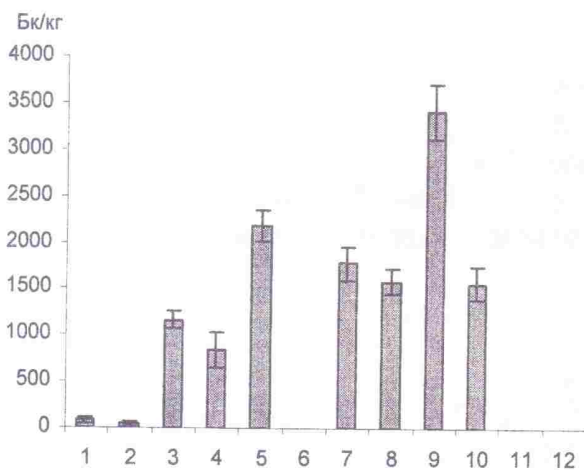


Рис. 5. Содержание радионуклидов 3 мая 1986 г. в верхнем слое почвы у левого берега КВ в районе буя 43 (Бк/кг сухой массы).

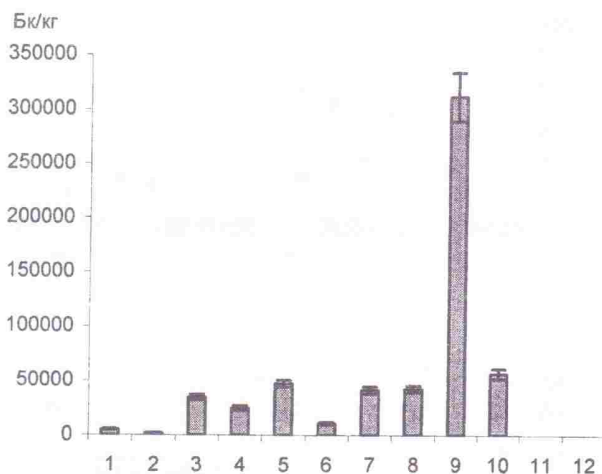


Рис. 6. Содержание радионуклидов 3 мая 1986 г. в хвое сосны обыкновенной у левого берега КВ в районе буя 43 (Бк/кг сухой массы).

1 - ^{137}Cs ; 2 - ^{134}Cs ; 3 - ^{141}Ce ; 4 - ^{144}Ce ; 5 - ^{103}Ru ; 6 - ^{106}Ru ; 7 - ^{95}Zr ; 8 - ^{95}Nb ; 9 - ^{131}I ; 10 - $^{140}\text{Ba}+^{140}\text{La}$; 11 - ^{132}Te ; 12 - ^{239}Np .

Всего в 1986 г. на водную поверхность КВ выпало из атмосферы 9,5 ТБк ^{137}Cs и 3,3 ТБк ^{90}Sr [1].

Кроме гамма-излучающих РН, представленных на рис. 3 и 4, на протяжении 1986 г. в отдельных пробах воды КВ были отмечены в незначительных количествах (0,5 - 3,6 Бк/л) ^{60}Co , $^{110\text{m}}\text{Ag}$, ^{65}Zn . Вместе с некоторыми представленными выше зарегистрированными нами РН другими исследователями в воде КВ был отмечен ^{144}Pr [8].

Динамика содержания радионуклидов в воде в первый месяц после аварии была довольно сложной. В результате короткого периода естественного физического полураспада [9] во второй неделе мая исчезли ^{132}Te (рис. 7) и ^{239}Np . В первых числах мая были зарегистрированы наиболее высокие концентрации большинства РН (кроме ^{137}Cs), которые были обусловлены выпадениями РН непосредственно на зеркало КВ (рис. 7 и 8). В дальнейшем в этом году содержание РН в воде определялось процессами противоположной направленности:

выносом РН, выпавших на водную поверхность из атмосферы, в расположенное ниже по каскаду Кременчугское водохранилище;

радиоактивным распадом относительно короткоживущих РН (^{131}I , ^{140}Ba , ^{140}La);

смывом РН с прилегающих территорий;

накоплением и фиксацией РН гидробионтами;

осаждением РН со взвесьями в донные отложения;

“добеганием” РН, выпавших на акватории Киевского водохранилища и рек Припять, Десна, Тетерев, верхний Днепр.

В результате этих процессов к середине мая 1986 г. содержание РН (за исключением распавшихся к тому времени ^{132}Te и ^{239}Np) в воде достигло стабильного максимума, который во многом был обусловлен “добеганием” вышерасположенных водных масс Киевского водохранилища и р. Припять. Наиболее отчетливо этот пик стабильного максимума проявляется у легкорастворимых ^{131}I , ^{140}Ba + ^{140}La и ^{137}Cs (см. рис. 7 и 8).

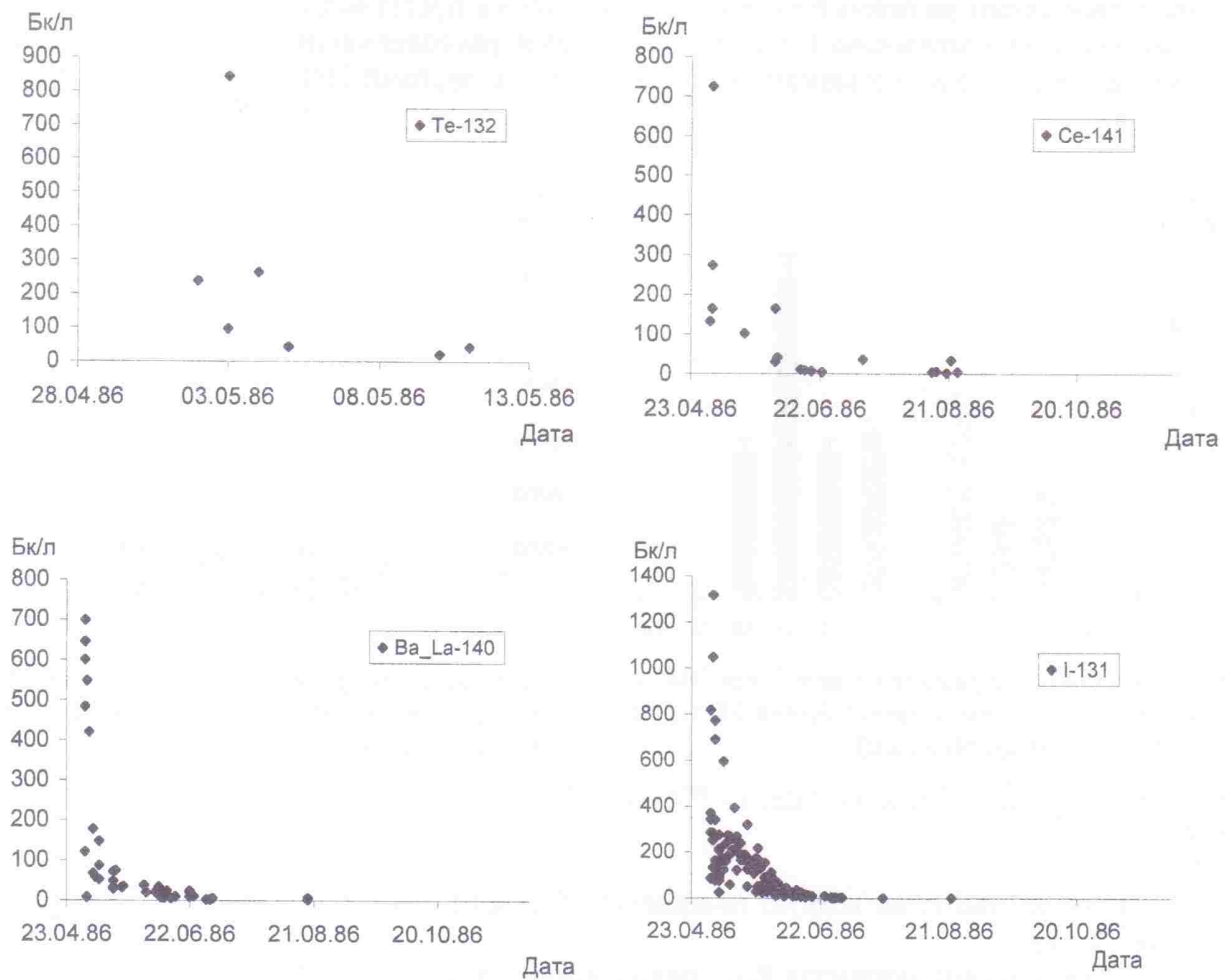


Рис. 7. Содержание ^{132}Te , ^{141}Ce , ^{144}Ba + ^{140}La , ^{131}I в воде КВ в 1986 г. (Бк/л).

С середины мая и до конца 1986 г. содержание РН в воде довольно плавно снижается в связи с:

распадом короткоживущих ^{131}I , ^{140}Ba и ^{140}La ;

выносом РН, выпавших с аэрозолями на Киевское водохранилище и впадающие в него реки, а затем поступающих в КВ;

накоплением РН водной биотой;

осаждением РН со взвесями на дно;

сорбцией РН донными отложениями.

К августу полностью исчезли ^{131}I , ^{140}Ba и ^{140}La и значительно снизилось содержание в воде остальных регистрируемых РН.

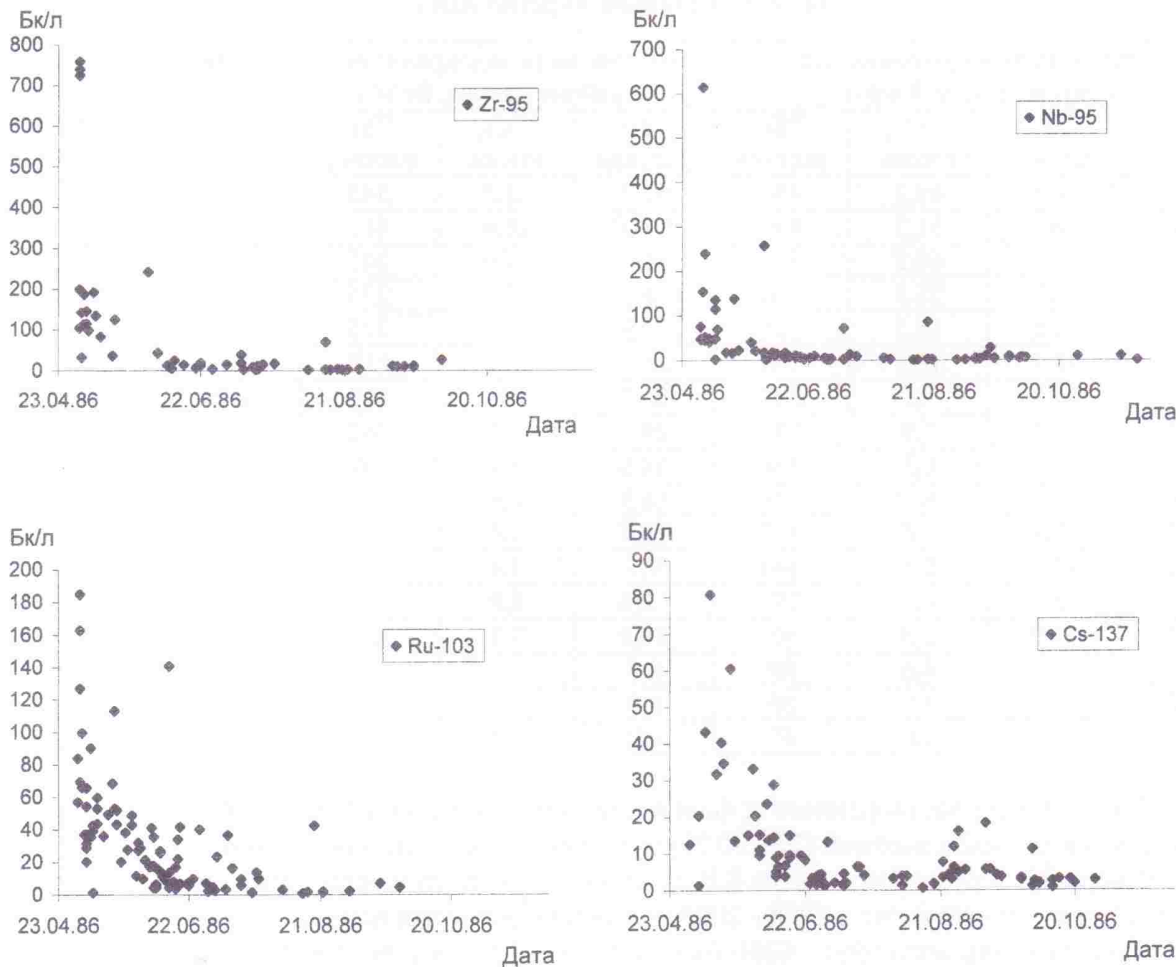


Рис. 8. Содержание ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{137}Cs в воде КВ в 1986 г (Бк/л).

С конца августа до второй недели сентября 1986 г. наблюдается относительно кратковременное повышение содержания в воде некоторых РН; наиболее отчетливо это проявляется на примере ^{137}Cs (см. рис. 8). Возможно, это повышение обусловлено воздействием гидрологических и метеорологических факторов.

По сравнению с первоначальным загрязнением к концу 1986 г. суммарное содержание гамма-излучающих РН в воде КВ снижается примерно в 1000 раз, обычно составляя 0,5 - 5 Бк/л, в отдельных случаях достигая 20 Бк/л.

Динамика содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде КВ (1987 - 2003 гг.). Среди искусственных РН в 1987 г. в фильтрованной воде постоянно регистрируются только ^{137}Cs , ^{134}Cs и ^{90}Sr . В отдельных пробах, на пределе возможностей анализирующей аппаратуры, обнаруживаются незначительные количества изотопов рутения, ^{95}Zr , ^{95}Nb . Из-за довольно короткого периода

полураспада [8] и относительно малой растворимости форм физико-химического состояния этих РН их содержание в воде значительно снизилось по сравнению с 1986 г. и после 1987 г. нами не обнаруживались.

В отличие от водоема-охладителя ЧАЭС ^{134}Cs вел себя в экосистеме КВ так же, как и ^{137}Cs [10, 11]. ^{134}Cs , по сравнению с ^{137}Cs , обладает более коротким периодом полураспада, кроме того, его содержание было значительно меньшим, чем ^{137}Cs , поэтому мы его не рассматриваем в данной работе.

Содержание ^{137}Cs , как растворенного, так и фиксированного на взвесьях, продолжает снижаться (табл. 1).

Таблица 1. Среднегодовое содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде КВ в 1987 – 2003 гг., Бк/м³ (по данным УкрНИГМИ)

Годы	Верхняя часть водохранилища (в районе Киева, Бк/м ³)			Нижняя часть водохранилища (в районе Канева, Бк/м ³)			В среднем по водохранилищу, Бк/м ³	
	^{137}Cs , раствор	^{137}Cs , взвесь	^{90}Sr , раствор	^{137}Cs , раствор	^{137}Cs , взвесь	^{90}Sr , раствор	^{137}Cs , раствор	^{90}Sr , раствор
1987	360	69,3	410	98,4	25,5	343	229,2	376,5
1988	261	51,3	460	133,0	26,6	411	197,0	435,5
1989	183	60,2	294	76,7	27,0	247	129,9	270,5
1990	106	25,5	244	36,1	12,7	226	71,5	235,0
1991	70,5	16,5	325	34,9	6,0	275	52,7	300,0
1992	45,7	12,4	138	25,6	7,8	118	35,7	128,0
1993	46,3	9,9	264	25,7	7,3	222	35,5	243,0
1994	35,3	7,9	281	28,5	8,3	262	31,9	271,5
1995	23,5	6,5	96	14,6	5,9	96	19,1	96,0
1996	16,5	6,5	125	16,9	6,9	99	16,7	112,0
1997	20,3	4,8	102	12,7	3,4	95	16,5	98,5
1998	13,5	5,1	140	9,5	4,4	123	11,5	131,5
1999	13,2	4,9	286	12,6	6,9	230	12,9	258,0
2000	12,9	3,3	88	10,9	3,5	86	11,9	87,0
2001	11,9	4,6	80	8,5	1,9	65	10,2	72,5
2002	14,0	1,5	50	6,3	2,1	74	10,2	62,0
2003	11,5	1,6	47	6,7	1,0	51	9,1	49,0

Соотношение растворенного и фиксированного на взвесьях ^{137}Cs с 1987 по 2003 г. довольно постоянно как в верхней (72 - 90 % растворенного), так и в нижней (64 - 87%) частях КВ.

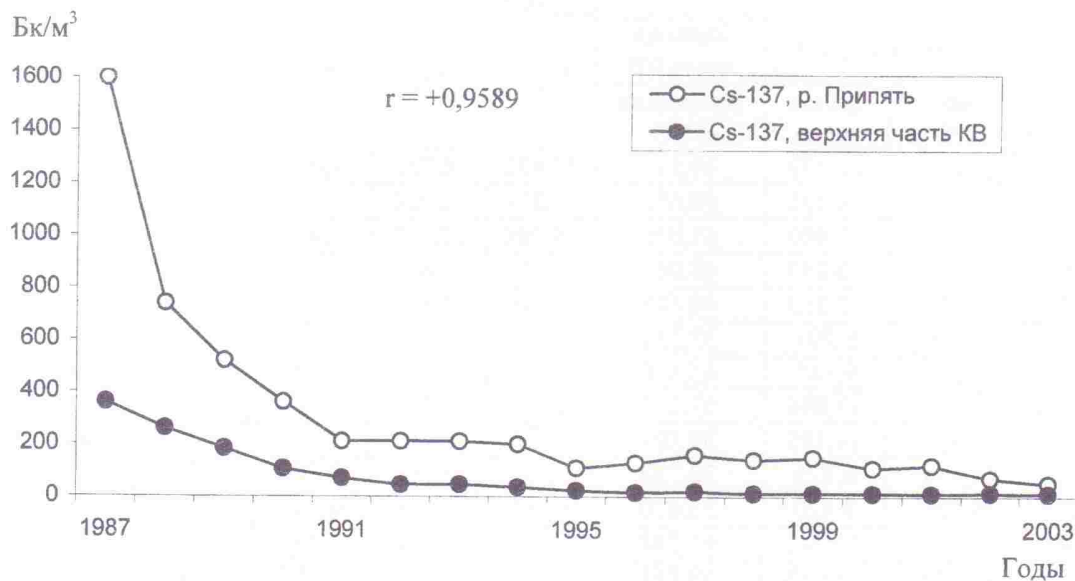
В верхней – русловой – части КВ происходит перемешивание практически «чистых» наносов Десны (60 - 80 Бк/кг в 1998 - 2003 гг.) с загрязненными наносами, поступающими из Киевского водохранилища (660 - 6200 Бк/кг в 1998 - 2003 гг.). Всего из Киевского водохранилища и из р. Десны в КВ поступает около 400 тыс. т наносов в год (согласно расчетам УкрНИГМИ). Значительная часть этих наносов оседает на дно при выходе воды на широкую озерную часть акватории КВ, начинающуюся ниже г. Украинка.

Отсюда и почти до плотины Каневской ГЭС правый берег КВ во многих местах интенсивно разрушается вследствие оползней и волнового воздействия. Поступающий в воду «чистый» материал берегового размыва в количестве 480 тыс. т в год [12] активно сорбирует ^{137}Cs из воды, в результате чего концентрации активности растворенного ^{137}Cs на участке «Киев – Канев» уменьшаются на 30 - 70 %. В дальнейшем большая часть этого материала оседает на дно в пределах КВ, завершая, таким образом, цикл пребывания значительной части ^{137}Cs в водной толще.

Основное количество ^{137}Cs и ^{90}Sr поступает через Киевское водохранилище в КВ из р. Припять (табл. 2), причем между содержанием этих радионуклидов в воде р. Припять и КВ существует тесная зависимость (рис. 9 и 10).

Таблица 2. Динамика поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr со стоком основных водоисточников в КВ, ТБк (данные УкрНИГМИ)

Годы	Основные водоисточники Киевского водохранилища								р. Десна	
	р. Припять		р. Днепр		р. Уж		р. Брагинка			
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
1987	12,7	10,4	13,9	8,0	0,63	0,70	0,12	0,1	2,1	1,9
1988	9,5	18,7	9,3	5,2	0,56	0,48	0,31	0,1	1,3	2,4
1989	6,4	8,9	7,1	3,6	0,26	0,37	0,11	0,09	1,2	1,3
1990	4,6	10,1	5,2	3,7	0,3	0,7	0,09	0,09	0,85	1,8
1991	2,7	14,0	2,0	4,5	0,26	0,67	0,13	0,19	0,63	1,1
1992	1,7	4,4	1,3	0,67	0,22	0,15	0,13	0,09	0,26	0,74
1993	3,9	13,6	0,96	1,2	0,15	0,56	0,11	0,18	0,04	0,48
1994	3,3	11,0	1,0	2,8	0,22	0,67	0,24	0,37	0,04	0,56
1995	1,1	3,2	0,63	0,7	0,07	0,15	0,07	0,1	0,04	0,22
1996	1,4	2,8	0,3	0,7	0,1	0,24	0,07	0,07	0,04	0,34
1997	1,0	3,5	0,26	0,64	0,06	0,16	0,11	0,17	0,07	0,23
1998	1,4	5,9	0,71	1,5	0,26	0,57	0,2	0,38	0,02	0,63
1999	3,3	10,3	0,56	1,2	0,11	0,29	0,22	0,42	0,02	0,37
2000	1,8	3,5	0,3	0,97	0,09	0,19	0,07	0,13	0,015	0,27
2001	1,5	3,3	0,22	0,56	0,09	0,27	0,15	0,23	0,02	0,2
2002	0,9	1,7	0,21	0,5	0,03	0,04	0,07	0,07	0,02	0,27
2003	0,52	1,4	0,11	0,22	0,03	0,06	0,04	0,03	0,02	0,1

Рис. 9. Динамика содержания растворенного ^{137}Cs в воде р. Припять [13] и КВ (Бк/м³).

Особенно четко прослеживается корреляция содержания ^{90}Sr в воде р. Припять и КВ; здесь коэффициент корреляции составляет $r = +0,9636$ (см. рис. 10).

На основе данных табл. 1 рассчитан внешний баланс (поступление - вынос) ^{137}Cs и ^{90}Sr в КВ (табл. 3). Всего в 1987 – 2003 гг. с водными массами в КВ поступило около 69 ТБк ^{137}Cs и 160 ТБк ^{90}Sr . Почти половина (около 54 %) ^{137}Cs осталось в экосистеме КВ, вероятно, благодаря осаждению взвесей и сорбции его донными отложениями. Более растворимый ^{90}Sr , в основном, не фиксировался и транспортировался водным потоком далее вниз по каскаду Днепровских водохранилищ; его осталось в КВ только около 13 %.

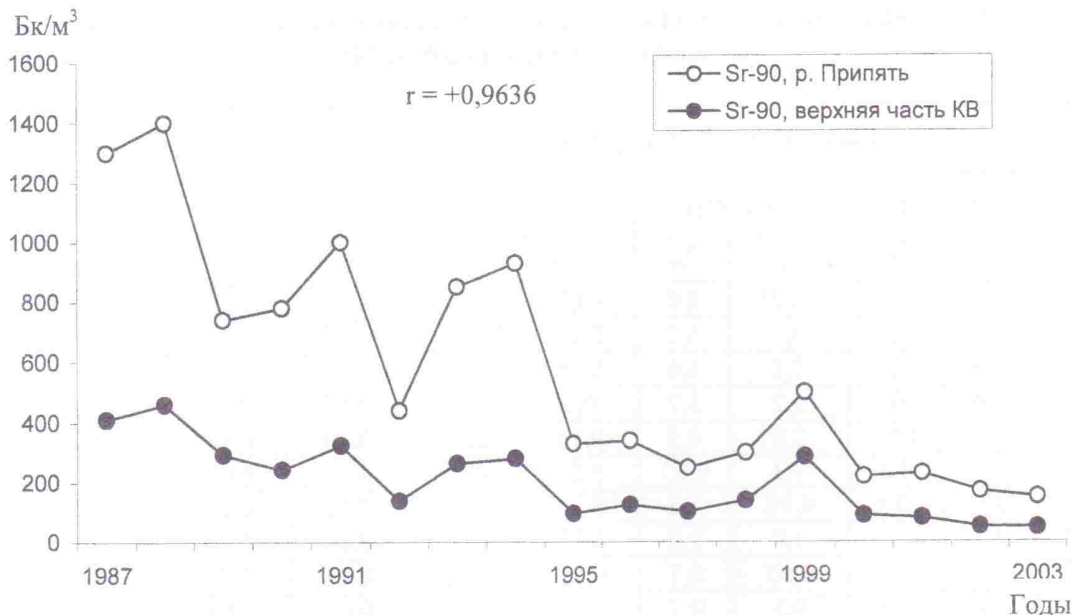


Рис. 10. Динамика содержания ⁹⁰Sr в воде р. Припять [13] и КВ (Бк/м³).

Таблица 3. Годовой сток (км³), динамика поступления и выноса ¹³⁷Cs (раствор + взвеси) и ⁹⁰Sr (раствор) и их запасы в КВ (п · 10¹² Бк)

Годы	Годовой сток, км ³			Поступление в КВ (п · 10 ¹² Бк)		Выход из КВ (п · 10 ¹² Бк)		Осталось в КВ (п · 10 ¹² Бк)	
	Верхняя часть КВ		Нижняя часть КВ	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr
	Киевская ГЭС	Десна, устье	Каневская ГЭС						
1987	29,432	11,479	40,511	17,972	16,759	5,019	13,885	12,953	2,874
1988	34,762	13,495	48,657	15,071	22,222	7,766	19,978	7,305	2,244
1989	31,61	10,400	43,010	10,208	12,370	4,460	10,619	5,608	1,501
1990	34,872	12,850	48,061	6,282	11,646	2,249	10,859	4,033	0,787
1991	36,509	12,313	48,565	4,248	15,852	1,986	13,374	2,262	2,748
1992	24,086	9,297	33,330	1,940	4,619	1,113	3,930	0,827	0,689
1993	36,806	9,147	45,418	2,584	12,143	1,499	10,100	1,085	2,043
1994	40,193	13,896	53,317	2,337	15,181	1,962	13,984	0,375	1,197
1995	28,704	11,195	39,107	1,596	3,822	0,802	3,754	0,794	0,068
1996	24,555	8,925	32,732	1,105	4,185	0,779	3,240	0,326	0,945
1997	26,822	8,420	35,020	0,885	3,595	0,564	3,327	0,321	0,268
1998	50,385	15,341	65,248	1,223	9,173	0,907	8,056	0,316	1,117
1999	45,604	13,638	59,061	1,073	16,957	1,152	13,578	-0,079	3,379
2000	34,810	12,487	44,429	0,766	4,153	0,640	3,838	0,126	0,315
2001	33,592	12,910	40,960	0,767	3,742	0,426	2,662	0,341	1,080
2002	26,073	9,114	33,744	0,545	1,743	0,283	2,501	0,262	-0,758
2003	24,007	10,153	32,482	0,447	1,599	0,250	1,644	0,197	-0,045
Всего				69,049	159,761	31,857	139,329	37,052	20,452
								(53,7%)	(12,8%)

По расчетам, представленным в табл. 3, следует, что в 1999 г. ¹³⁷Cs и в 2002 – 2003 гг. ⁹⁰Sr из КВ вместе со стоком вышло несколько больше, чем поступило в него. Необходимо отметить, что если исходные данные (результаты измерений), полученные различными лабораториями, были недостаточно достоверны, тогда расчеты, приведенные в табл. 3, могут

быть не совсем корректны (см. раздел “Материал и методика исследований”). Все же мы исходим из предпосылок о достаточной репрезентативности и достоверности анализируемых данных, что опосредованно подтверждают результаты работы [14]. Считается, что накопление РН организмом не связано с их радиоактивностью [15]. Следовательно, коэффициенты накопления РН отдельно взятыми видами биоты сходных водоемов с различными уровнями РН загрязнения (в границах радиационной толерантности организма), при прочих равных условиях, должны быть сходны. Анализ содержания ^{137}Cs в плотве и воде КВ и водоема-охладителя ЧАЭС в 1987 – 2003 гг. показал практически полное совпадение численных значений динамики коэффициентов накопления ^{137}Cs плотвой этих водоемов [14]. Таким образом, данные различных исследователей хорошо согласуются между собой.

Итак, предполагая, что исходные данные были достаточно достоверны, можно объяснить дисбаланс РН, иногда наблюдающийся в КВ в последние годы следующим. По-видимому, наступает определенное “насыщение” водохранилища РН под совокупным воздействием комплекса факторов. Водные массы, питающие КВ, с каждым годом вносят в него все меньшее количество РН. Вместе с тем накопленные в КВ РН включаются в циклические миграционные процессы: накопление РН из воды и донных отложений высшей водной растительностью → отмирание растений → осаждение детрита и остатков растений на дно → разложение растительных остатков (собственно, превращение их в донные отложения) → накопление РН из воды и донных отложений в следующий вегетационный период. При этом содержание РН в донных отложениях на месте интенсивного роста зарослей растительности со временем может увеличиваться [16]. Аналогичные циклы миграции РН в водных экосистемах происходят с участием планктона, водорослей, моллюсков и др. В различных участках таких циклов РН могут находиться в разном состоянии и физико-химической форме, что определяет их растворимость.

С течением времени увеличивается роль высших водных растений в круговороте РН в КВ. В послеаварийные годы КВ активно зарастает высшей водной растительностью, такой как тростник, рогоз, чилим и др. По нашим предварительным оценкам, с 1986 г. по 2003 - 2005 гг. биомасса высшей водной растительности в КВ увеличилась в 2 - 3 раза. Значительно расширились участки, ею занимаемые. Так, чилим, из представителя редких видов, занесенных в “Красную книгу” Украины, превратился в один из наиболее распространенных видов, который даже может вызывать помеху для судоходства на мелководьях, занимая значительную их часть.

Вероятно, большой вклад в миграцию РН начали вносить процессы их десорбции из донных отложений.

КВ – открытая полуприродная экосистема, подвергающаяся как естественным сукцессиям, так и антропогенному воздействию. РН, поступившие в него в результате аварии на ЧАЭС, видимо, не повлияли на ее состояние. Скорее наоборот, процессы, происходящие в экосистеме, и ее состояние могут заметно влиять на распределение и миграцию РН в ней.

Заключение

Первые “чернобыльские” РН в Киеве были зарегистрированы в 12 ч 00 мин местного времени 30 апреля 1986 г. на территории Института ядерных исследований. Они выпадали в форме сухих аэрозолей. Гамма-фон в течение 1 - 2 ч вырос с естественных уровней до 2,2 - 3,2 мР/ч.

2 - 4 мая 1986 г. была проведена первая послеаварийная экспедиция на акватории КВ по маршруту “Киев - Ржищев - Киев”. Анализ отобранных проб внешней среды показал высокое содержание искусственных РН в воде и некоторых компонентов этого водоема. Суммарное содержание гамма-излучающих РН в воде, отобранной в районе г. Ржищев, достигало 6 кБк/кг. Такие высокие уровни содержания РН были обусловлены аэрозольными выпадениями.

Во второй - третьей неделе мая на содержание РН в воде КВ оказало влияние дополнительное их поступление с "добегающими" водными массами с верхних более загрязненных участков бассейна. Влияние естественного процесса радиоактивного распада на содержание короткоживущих РН в воде компенсировалось их дополнительным поступлением из более загрязненных расположенных выше территорий водосбора. Всего в первой половине мая 1986 г. нами зарегистрировано 15 гамма-излучающих РН "чернобыльского" происхождения.

Расчет поступления РН в КВ в 1986 г. предполагается представить в последующей статье.

В результате распада, накопления РН компонентами исследуемого водохранилища и компонентами расположенных выше по течению более «загрязненных» экосистем содержание радиоактивных изотопов в воде КВ к концу 1986 г. снизилось в сотни раз. С этого времени радионуклидное загрязнение воды было обусловлено почти на 100 % изотопами цезия (особенно ^{137}Cs) и ^{90}Sr . После распада ^{134}Cs , с начала 90-х годов, радиационный вклад в загрязнение воды искусственными РН, как правило, определяют ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Почти весь ^{90}Sr находился в воде в растворенной форме. Соотношение растворенного и фиксированного на взвешях ^{137}Cs в воде с 1987 по 2003 г. было довольно постоянно; в верхней части водоема в растворенном виде содержалось от 72 до 90 % ^{137}Cs , а в нижней – от 64 до 87 %.

После завершения периода интенсивных выпадений содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде КВ, в основном, обусловлено их поступлением из вышерасположенных территорий водосбора Киевского водохранилища и р. Десна. Обнаружена тесная взаимосвязь содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в КВ и р. Припять, впадающей в Киевское водохранилище ($^{90}\text{Sr} r = +0,9636$ и $^{137}\text{Cs} r = +0,9589$).

В 1987 - 2003 гг. с водными массами в КВ всего поступило около 69 ТБк ^{137}Cs и 160 ТБк ^{90}Sr ; 54 % ^{137}Cs осталось в экосистеме КВ; ^{90}Sr , в основном, не фиксировался компонентами и транспортировался водным потоком далее вниз по каскаду Днепровских водохранилищ; его осталось в КВ около 13 %.

По расчетным данным, в 1999 г. ^{137}Cs и в 2002 - 2003 гг. ^{90}Sr из КВ вместе со стоком вышло незначительно больше, чем поступило в него. Следует отметить, что авторы не могут достоверно подтвердить эти расчеты, так как исходные данные (результаты измерений) были получены в разное время различными лабораториями.

Возможно, наряду со снижением поступления ^{137}Cs и ^{90}Sr из вышерасположенных водисточников, вероятными причинами данного явления может быть влияние биоты на растворимость их физико-химических форм нахождения и десорбция этих РН из донных отложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Канивец В.В.* Анализ основных тенденций развития радиационной обстановки в Днепровской водной системе после Чернобыльской аварии // Вісник аграрної науки. - 1996, № 4. - С. 39 - 48.
2. *Инструкции* и методические указания по оценке радиационной обстановки на загрязненной территории. - М.: Госкомгидромет СССР, 1989. - 118 с.
3. *Совершенствование* и ведение межведомственной системы радиационного мониторинга днепровских водохранилищ и водных объектов в зоне влияния Чернобыльской аварии. Анализ и изучение абиотических факторов и процессов, определяющих миграцию радиоактивных веществ в днепровских водохранилищах, для оценки самоочищающей способности водохранилищ и прогнозирования отдаленных последствий их аварийного загрязнения: (Заключит. отчет о НИР) / УкрНИГМИ; Отв. исполн. В. В. Канивец. - Хоздоговор с МинЧернобылем Украины № 1/92. - К., 1992.
4. *Сборник методик* по определению радиоактивности окружающей среды. Часть II. Методики радиохимического анализа / Под ред. Г. А. Середы и З. С. Шулепко. - М.: Гидрометеиздат, 1966. - 52 с.
5. *Зарубин О.Л., Шатрова Н.Е.* Аккумуляция радионуклидов на берегах пресноводных экосистем // Материалы междунар. конф. молодых ученых "Водные биоресурсы и пути их рационального использования", Киев, 31.01 – 01.02. 2000. - К., 2000. - С. 119 - 121.
6. *Zarubin O.L. Shatrova N.E., Laktionov V.A.* Accumulation of radionuclides on the Kanevskoe reservoir shores after Chernobyl accident // Abstracts International conference "Modern problems of radiobiology, radioecology and evolution" dedicated to centenary of N. W. Timofeeff-Ressovsky, Sept. 6 - 9, 2000. - Dubna, 2000. - P. 207.

7. Зарубин О.Л., Волкова Е.Н., Беляев В.В., Широкая З.О. Радионуклиды в компонентах экосистемы Каневского водохранилища // Гидробиол. журн. - 2003. - 39, № 1. - С. 39 - 50.
8. Кленус В.Г., Матвиенко Л.П., Каглян А.Е., Сипченко П.В. Содержание радионуклидов в воде водохранилищ Днепровского каскада // Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС / Под ред. Д. М. Гродзинского. - К.: Наук. думка, 1992. - С. 65 - 89.
9. Козлов В.Ф. Справочник по радиационной безопасности. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 352 с.
10. Зарубин О.Л., Шатрова Н.Е. Поведение цезия-137 и цезия-134 в некоторых объектах зоны отчуждения ЧАЭС // Матеріали щорічної наукової конференції Ін-ту ядерних досл. - К., 1997. - С. 365 - 368.
11. Шатрова Н.Е., Зарубин О.Л. Искусственные радионуклиды в хвое сосны обыкновенной острова Надежды Каневского водохранилища // Там же. - С. 344 - 349.
12. Изучить гидрологические условия осадкообразования и динамики наносов в днепровских водохранилищах. Рассчитать баланс наносов в днепровской водной системе в условиях современного и перспективного использования: - (Промежуточ. отчет о НИР по теме П.4.3) / УкрНИГМИ; Отв. исполн. А. М. Лучик. - К., 1993.
13. Деревець В.В., Кіреєв С.І., Ткаченко Ю.В. та ін. Радіаційний стан зони відчуження в 2003 році // Бюлетень екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. Квітень 2003. - № 1 (23). - С. 6. - 32.
14. Зарубин О.Л., Тришин В.В., Волкова Е.Н. и др. ^{137}Cs в плотве водоемов с различными уровнями радионуклидного загрязнения // 36. науч. ст. міжнар. наук.-практ. конф. "Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення", м. Алушта, АР Крим, Україна, 12 - 16 вер. 2005 р., т. 2 / УкрНДІ-ЕП. - Х.: Райдер, 2005. - С. 265 - 269.
15. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 149 с.
16. Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревець В.В. та ін. Радіонукліди у водних екосистемах України. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіоти зони відчуження. - К.: Чорнобильінтерінформ, 2001. - 318 с.

ВМІСТ РАДІОНУКЛІДІВ У ВОДІ КАНІВСЬКОГО ВОДОСХОВИЩА ПІСЛЯ АВАРІЇ НА ЧАЕС 1986 р.

О. Л. Зарубін, В. В. Канівець

У 1986 – 2003 рр. вивчався вміст радіонуклідів у воді Канівського водосховища р. Дніпро. У 1986 р. зареєстровано 15 гамма-випромінюючих радіонуклідів з максимальною сумарною активністю 3 травня – 6 кБк/л. Первісне радіонуклідне забруднення акваторії Канівського водосховища відбулося через 4 - 6 діб після аварії на ЧАЕС та формувалося аерозольними випадіннями на його акваторію. Через 10 - 20 діб після аварії на ЧАЕС радіонукліди почали надходити в Канівське водосховище з водними масами північних територій водозбору. З 1987 р радіоактивність води визначали ^{137}Cs та ^{90}Sr . Їхній вміст, в основному, визначався надходженням "брудної" води з Київського водосховища.

CONTENT OF RADIONUCLIDES IN THE WATER OF KANEV RESERVOIR AFTER ACCIDENT ON ChNPP IN 1986

O. L. Zarubin, V. V. Kanivets

The content of radionuclides in the water of Kanevskoe reservoir of river Dnepr was studied from 1986 till 2003. In 1986 15 gamma-emitting radionuclides are registered with the maximal total activity on May, 3rd – 6 kBq/l. The primary radionuclides' pollution of the water area of Kanev reservoir have occurred through 4 - 6 days after accident on ChNPP and it was formed by aerosol losses on the water area of Kanev reservoir. Through 10 - 20 days after accident on ChNPP radionuclides have started to arrive to Kanev reservoir with water from northern territories of columbia. ^{137}Cs and ^{90}Sr determined radioactivity of the water since 1987. Their content, basically, was determined by accession of "dirty" water from Kiev reservoir.

Поступила в редакцію 05.08.05,
после доработки – 23.11.05.