

УДК [577.34:581.526.3](285.33)

*З. О. Широкая, В. Г. Кленус, Д. И. Гудков, А. Е. Каглян,  
Т. Н. Дьяченко*

**СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ  $^{90}\text{Sr}$  И  $^{137}\text{Cs}$  В  
ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЯХ КИЕВСКОГО  
ВОДОХРАНИЛИЩА**

В работе проанализированы особенности накопления  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  высшими водными растениями Киевского водохранилища с 1991 по 2008 г. Отмечается снижение удельной активности обоих радионуклидов, но в последние годы этот процесс для  $^{137}\text{Cs}$  идет более активно, что приводит к увеличению отношения  $^{90}\text{Sr}$  к  $^{137}\text{Cs}$ . Поступление радионуклидов чернобыльского происхождения с территории водосбора р. Припяти обусловило более интенсивное загрязнение  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  правобережной части водохранилища по сравнению с левобережной.

**Ключевые слова:** радионуклиды,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , Киевское водохранилище, высшие водные растения.

В результате аварии на Чернобыльской АЭС радионуклидному загрязнению подверглись огромные территории в Украине и в сопредельных государствах. Основное количество радионуклидов поступило на площадь водосбора Днепра и его водохранилищ, наиболее загрязненным из которых оказалось Киевское.

Высшие водные растения являются одним из доминирующих по биомассе компонентов экосистем мелководий, занимающих в водохранилищах значительные площади. Задерживая радиоактивные вещества, поступающие с площади водосбора, а также извлекая их из воды, высшие водные растения выполняют функцию естественного биофильтра. Помимо этого, растения играют важную роль в процессах концентрирования и биогенной миграции радионуклидов в водоеме [7, 11, 14]. Их роль в самоочищении экосистем определяется как уровнем накопления, прочностью фиксации и длительностью выведения радионуклидов из круговорота веществ, так и величиной фитомассы и размерами заросших площадей.

Целью наших исследований было изучение накопления высшими водными растениями Киевского водохранилища долгоживущих радионуклидов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в период 1991—2008 гг.

© Широкая З. О., Кленус В. Г., Гудков Д. И., Каглян А. Е., Дьяченко Т. Н., 2009

**Материал и методика исследований.** Радиозэкологические исследования проводили в ценозах наиболее распространенных видов высших водных растений: в 1991, 2006 и 2008 гг. — на правом берегу Киевского водохранилища, в районе с. Страховское, примыкающем к зоне отчуждения ЧАЭС; в 2000—2005 гг. — на левом берегу, в урочище Окуниново и около с. Лебедевки.

Содержание радионуклидов в растениях определяли стандартными гамма-спектрометрическими и радиохимическими методами [6]. Концентрацию радионуклидов в растениях рассчитывали в Бк/кг сухой массы. Ошибка измерений не превышала 20%. Определение высших водных растений проводили по определителю под редакцией Ю.Н. Прокудина [10].

Изучали виды, доминирующие по биомассе и численности [3]. В заливе в районе с. Страховское в результате растительных сукцессий многие виды растений, особенно погруженных, утратили доминирующие позиции или выпали из состава флоры. В настоящее время максимальные площади здесь заняты рогозовыми ценозами и сообществами растений с плавающими листьями.

В 1991 г. из воздушно-водных ВВР были отобраны: аир обыкновенный — *Acorus calamus* L., манник большой — *Glyceria maxima* (C. Gartm.), рогоз узколистный — *Typha angustifolia* L., стрелолист стрелолистный — *Sagittaria sagittifolia* L., сусак зонтичный — *Butomus umbellatus* L., схеноплект озерный — *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla, тростник обыкновенный — *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud, частуха подорожниковая — *Alisma plantago-aquatica* L.;

— из погруженных: водяной лютик фенхелевидный (шелковник) — *Batrachium foeniculaceum* (Gilib.) V.Krecz, наяда морская — *Najas marina* L., рдест гребенчатый — *Potamogeton pectinatus* L., рдест блестящий — *P. lucens* L., рдест пронзеннолистный — *P. perfoliatus* L., рдест курчавый — *P. crispus* L., уруть колосистая — *Myriophyllum spicatum* L., элодея канадская — *Elodea canadensis* Michx., альдрованда пузырчатая — *Aldrovanda vesiculosa* L., роголистник погруженный — *Ceratophyllum demersum* L., ряска трехбороздчатая — *Lemna trisulca* L., телорез алоэвидный — *Srtatiotes aloides* L.;

— из растений с плавающими листьями: водокрас обыкновенный — *Hydrocharis morsus-ranae* L., водяной орех — *Trapa natans* L., кубышка желтая — *Nuphar lutea* (L.) Smith., кувшинка белая — *Nymphaea alba* L.; многокоренник обыкновенный — *Spirodela polyrrhiza* (L.) Schleid., ряска малая — *Lemna minor* L., сальвиния плавающая — *Salvinia natans* (L.) All. В 2008 г. кроме перечисленных видов растений была отобрана также осока острая — *Carex acuta* Curt.

### **Результаты исследований и их обсуждение**

Мелководный хорошо прогреваемый залив в районе с. Страховское характеризовался значительным видовым богатством макрофитов. В 2006 и 2008 гг. было установлено, что по сравнению с 1991 г. растительный покров

в заливе подвергся заметным трансформациям — значительно сократилась площадь зарослей погруженных растений, изменилось видовое разнообразие, исчезли некоторые сообщества. Произраставшие здесь в 1991 г. 8 видов воздушно-водных, 12 видов погруженных и 7 видов растений с плавающими листьями заменили густые заросли рогоза узколистного и изредка тростника обыкновенного, что свидетельствует об идущих процессах заболачивания, характерных для верхнего участка Киевского водохранилища. За зарослями рогоза на более глубоких участках часто встречались поля кубышки желтой, изредка кувшинки белой и водяного ореха, а вдоль береговой линии — заросли манника большого, водокраса обыкновенного, сообщества роголистника погруженного, разреженные заросли рдеста пронзеннолистного и урути колосистой.

После аварии на ЧАЭС (исследования, проведенные в мае 1986 г.) в высших водных растениях Киевского водохранилища было зарегистрировано 13, в основном короткоживущих, радионуклидов, их концентрации (суммарная гамма-радиоактивность) колебались от 31,5 до 188 700,0 Бк/кг (в среднем 165 380,0 Бк/кг). С 1989 г. основное значение в формировании радионуклидного загрязнения растений имеют долгоживущие и наиболее экологически опасные  $^{90}\text{Sr}$  (21%) и  $^{137}\text{Cs}$  (60—85,5%) [15], с периодом полураспада около 30 лет. Являясь химическими аналогами биогенных элементов кальция и калия, соответственно, они принимают активное участие в метаболизме и включаются в структуру как самих растений, так и других компонентов биогеоценозов.

Исследования в 1991 г. показали, что минимальное количество  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  содержится в растениях с плавающими листьями, максимальное содержание  $^{90}\text{Sr}$  отмечено в погруженных видах, а  $^{137}\text{Cs}$  — в воздушно-водных (таблица).

В группе воздушно-водных растений максимальная концентрация  $^{90}\text{Sr}$  была зарегистрирована в биомассе частухи подорожниковой, минимальная — в тростнике обыкновенном (рис. 1). Максимальное содержание  $^{137}\text{Cs}$  отмечали в аире обыкновенном, минимальное, на порядок ниже — в сценеплекте озерном (рис. 2). В группе погруженных растений максимальным содержанием  $^{90}\text{Sr}$  характеризовался рдест пронзеннолистный, минимальным — ряска трехбороздчатая (рис. 3).

Высокая концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в рдесте пронзеннолистном связана со способностью этого вида интенсивно осажать карбонат кальция на своей поверхности. Участие  $^{90}\text{Sr}$  как аналога Са в процессах карбонатообразования свидетельствует о возможной миграции этого радионуклида в водоемах в форме карбонатных соединений, на что указывает повышенный уровень содержания  $^{90}\text{Sr}$  как в карбонатном осадке, собранном с растительности, так и в богатых карбонатами илах на заросших участках. Так, например, в донных отложениях водоема-охладителя Игналинской АЭС на станциях отбора с хорошо развитой растительностью уровень содержания  $^{90}\text{Sr}$  был в 2 раза выше, чем на участках без нее, что связано с возвращением  $^{90}\text{Sr}$  на дно с карбонатным осадком на отмирающих растениях [14].

**Содержание радионуклидов в высших водных растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г., Бк/кг**

Экологические группы растений	$^{90}\text{Sr}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}/^{137}\text{Cs}$
Воздушно-водные	$\frac{335,2}{109,9 - 776,3}$	$\frac{2616,0}{738,5 - 7062,1}$	0,128
Погруженные	$\frac{402,1}{89,9 - 942,8}$	$\frac{2616,0}{738,5 - 7062,1}$	0,295
Растения с плавающими листьями	$\frac{155,1}{44,6 - 294,0}$	$\frac{1107,7}{322,4 - 1375,0}$	0,126

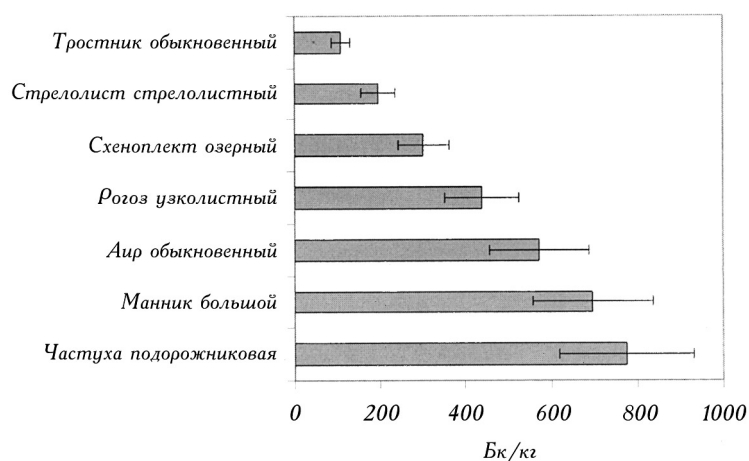
Примечание. Над чертой — средние значения, под чертой — пределы.

Максимальная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  зафиксирована в биомассе рдеста гребенчатого (2788,1) и водяного лютика фенхелевидного (2758,2 Бк/кг), а минимальная — в элодее канадской (661,7) и ряске трехбороздчатой (696,5 Бк/кг) (рис. 4).

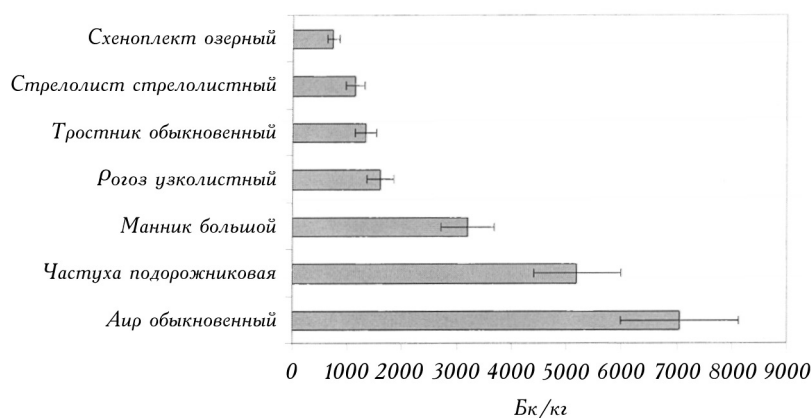
Среди растений с плавающими листьями максимальное содержание  $^{90}\text{Sr}$  отмечалось в сальвинии плавающей,  $^{137}\text{Cs}$  — в кубышке желтой (рис. 5). Минимальная удельная активность как  $^{90}\text{Sr}$ , так и  $^{137}\text{Cs}$  была характерна для водяного ореха.

В 1991 г. удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях правобережья Киевского водохранилища снизилась по сравнению с показателями 1986 г. соответственно в 1,5 и 3 раза, но превышала доаварийные в 39 и 2297 раз.

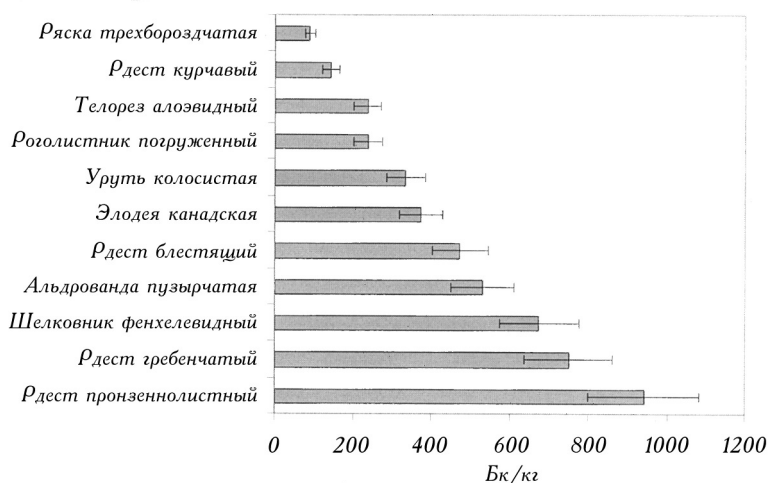
Радиозэкологические исследования, выполненные в 2000—2005 гг. на левобережье Киевского водохранилища в урочище Окуниново, показали, что концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в биомассе высших водных растений находилась на



1. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в воздушно-водных растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г.



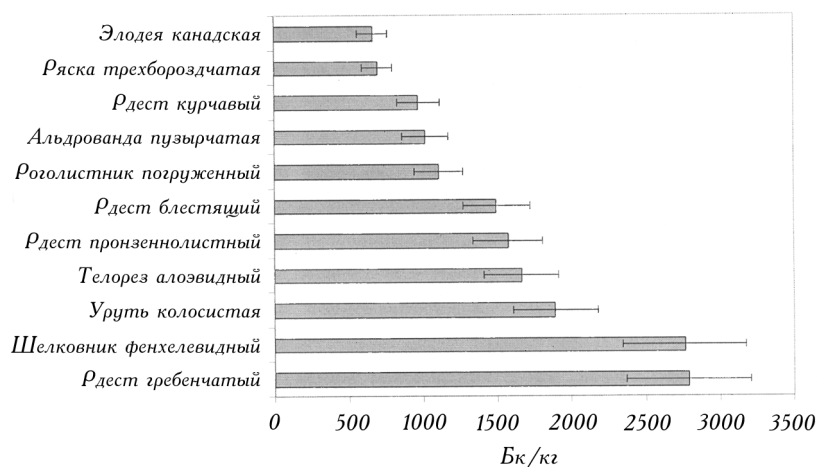
2. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в воздушно-водных растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г.



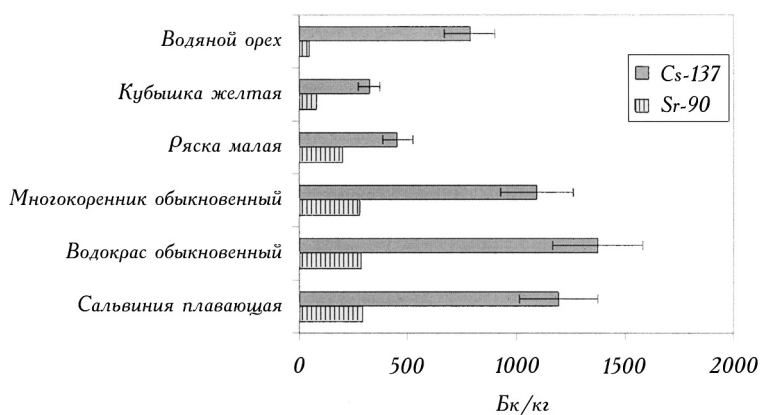
3. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  в погруженных растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г.

уровне 4,3—46,8 Бк/кг, в районе с. Лебедевки эти показатели были значительно выше —79,9—244,6 Бк/кг.

По-видимому, такие различия в накоплении радионуклидов объясняются тем, что мощный сток Днепра с более низким содержанием радионуклидов отгесняет воды притоков к правому берегу. Однако северный и северо-западный ветры обуславливают образование нескольких замкнутых циркуляций, расположенных в средней и нижней частях водохранилища, что приводит к различной интенсивности радионуклидного загрязнения водных масс по акватории водохранилища [13]. Кроме того, донные отложения в левобережной части водохранилища представлены песками, которые имеют меньшее содержание радионуклидов, чем илы и заиленные пески правобережья в районе Страховесья.



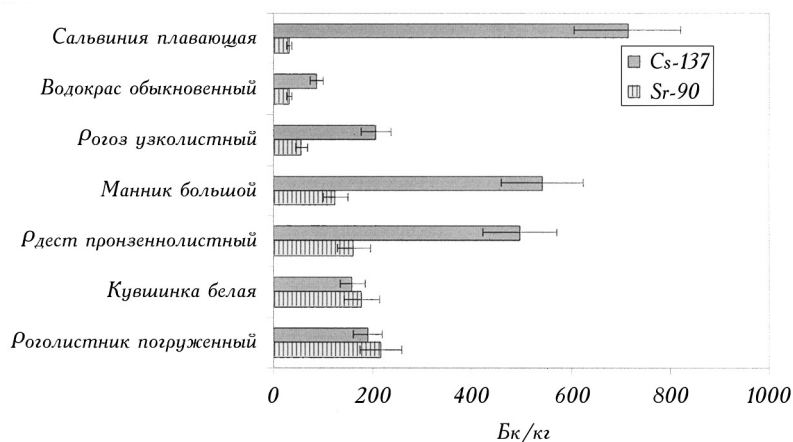
4. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в погруженных растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г.



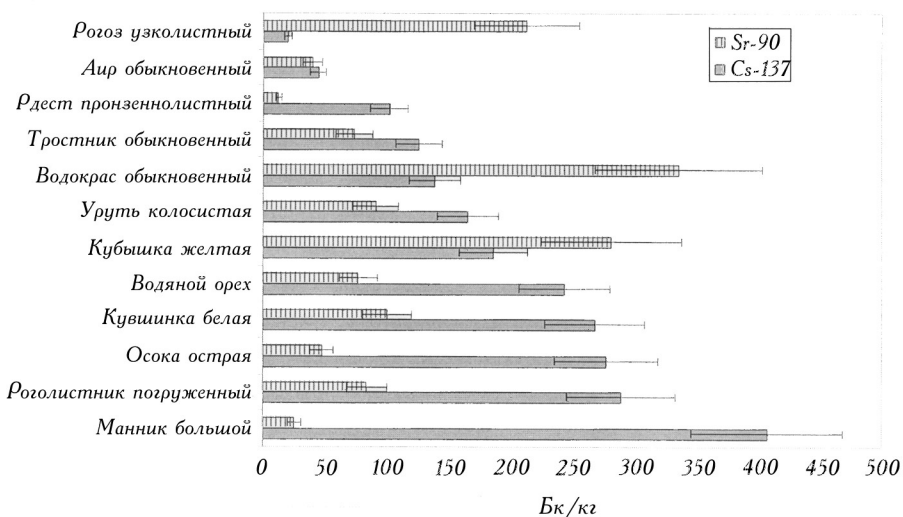
5. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в растениях с плавающими на поверхности воды листьями Киевского водохранилища (с. Страховесье), 1991 г.

В 2006 г. в биомассе растений, отобранных на правобережье (район с. Страховесье), удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  находилась в следующих пределах: для погруженных — 162,4—217,0 Бк/кг, воздушно-водных — 56,8—125,1, растений с плавающими листьями — 31,6—178,0; а  $^{137}\text{Cs}$ : для погруженных — 207—498, воздушно-водных — 188—1005, растений с плавающими листьями — 87,5—360,6 Бк/кг (рис. 6). Отношение  $^{90}\text{Sr}$  к  $^{137}\text{Cs}$  изменялось от 0,1 до 2,0. Согласно нашим данным, в 2008 г. максимальная концентрация  $^{90}\text{Sr}$  отмечена в биомассе аира обыкновенного — 336,0 Бк/кг, а минимальная — в биомассе осоки острой (рис. 7).

Более высоким содержанием  $^{137}\text{Cs}$  характеризуется биомасса манника большого, кувшинки белой и осоки острой, минимум отмечен в биомассе рогоза узколистного. Отношение  $^{90}\text{Sr}$  к  $^{137}\text{Cs}$  находилось в пределах



6. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 2006 г.



7. Содержание  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  в растениях Киевского водохранилища (с. Страховесье), 2008 г.

0,04—7,6. Уровень содержания  $^{90}\text{Sr}$  в высших водных растениях правобережья Киевского водохранилища превышал доаварийный в 10 раз,  $^{137}\text{Cs}$  — в 29 раз.

В 2008 г. по сравнению с 1991 г. содержание  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях снизилось: в маннике большом — в 4,8, роголистнике погруженном — в 8, в рдесте пронзеннолистном — в 11, тростнике обыкновенном — в 17, рогозе узколистном — в 76, аире обыкновенном — в 160 раз. Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в некоторых видах снизилась, но намного меньше — аире обыкновенном и роголистнике погруженном — в 2, в рогозе узколистном — в 21, рдесте пронзеннолистном в 24 раза, а в тростнике обыкновенном возросла почти в 2 раза. В последние годы повышение концентрации  $^{90}\text{Sr}$  в высших водных

растениях отмечено и в водоемах зоны отчуждения ЧАЭС [7,16]. В 2008 г. по сравнению с 1991 г. показатель отношения  $^{90}\text{Sr}$  к  $^{137}\text{Cs}$  возрос от 0,02—0,62 до 0,04—7,60. В тростнике обыкновенном и аире обыкновенном он составлял соответственно 2,8 и 7,6. В роголистнике погруженном, водяном орехе и рогозе узколистном содержание радионуклидов было примерно одинаковым.

Результаты исследований радионуклидного загрязнения донных отложений в растительных сообществах Киевского водохранилища, проведенных в 1991—1992 гг., показали, что заросли воздушно-водных растений осаждают значительное количество  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  вместе со взвесьями, таким образом удерживая их в пределах заросшей площади [11, 12]. Установлено, что в зарослях рдестов загрязнение донных отложений  $^{90}\text{Sr}$  в 3,5 раза,  $^{137}\text{Cs}$  в 2,5 раза выше, а в зарослях воздушно-водных растений — соответственно в 4—40 и 2—26 раз выше, чем на незаросшей части мелководий.

В конце вегетации из надземной части воздушно-водных растений происходит отток питательных веществ в интенсивно развитые многолетние корневища, а вместе с ними и депонирование на длительное время радионуклидов [2, 11, 12]. Кроме того, процессы разложения воздушно-водных растений (вследствие высокого содержания целлюлозы) протекают медленнее (тростник — до двух лет), чем растений погруженных и с плавающими листьями, отмершая фитомасса которых разлагается в течение 3—6 месяцев [1, 8, 9].

Воздушно-водные растения накапливают большее количество радионуклидов за счет продуцирования значительной фитомассы (продуктивность ценозов с преобладанием воздушно-водных на порядок выше, чем погруженных и растений с плавающими листьями). Низкопродуктивные ценозы погруженных растений характеризуются более высокой накопительной способностью, чем сообщества воздушно-водных растений. Однако после их отмирания в результате процессов деструкции 40% фитомассы макрофитов [1, 8], а вместе с ней и поглощенных радионуклидов, переходит в донные отложения, часть же в растворенной форме поступает в водную толщу, обуславливая вторичное загрязнение водоема.

### **Заключение**

В процессе роста водные растения поглощают из воды и грунта радионуклиды, исключая их на длительное время из круговорота веществ в водоеме и выполняя тем самым важную очистительную функцию. Количество радионуклидов, извлеченных из воды высшими водными растениями, зависит от вида растений, величины продуцируемой ими фитомассы и экологических условий, в которых она формируется.

С 1989 г. радионуклидное загрязнение растений Киевского водохранилища было обусловлено в большей степени  $^{137}\text{Cs}$ , но исследования последних лет показали, что возрастает вклад  $^{90}\text{Sr}$ . В 2008 г. наблюдается увеличение, отношения  $^{90}\text{Sr}$  к  $^{137}\text{Cs}$  в некоторых видах высших водных растений.

Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в высших водных растениях правобережья Киевского водохранилища снизилось по сравнению с 1986 г. в 29 раз, а  $^{90}\text{Sr}$  — в 6 раз, но эти значения превышают доаварийные показатели соответственно в 243 раза и 10 раз. Это связано, очевидно, с многочисленными факторами, которые формировали радионуклидное загрязнение  $^{137}\text{Cs}$  экосистемы этого водоема: осаждением со взвешьями на дно вследствие седиментационных процессов, захоронением его в более глубокие слои грунтов и физико-химическими характеристиками последних. Более подвижный  $^{90}\text{Sr}$  в больших количествах продолжает поступать в экосистему Киевского водохранилища.

Высшие водные растения осаждают радионуклиды со взвешьями, задерживая их на ограниченной площади. Подтверждением этого факта может служить более высокий уровень загрязнения донных отложений в зарослях по сравнению с незаросшей акваторией.

Ведущая роль воздушно-водных растений по сравнению с другими экологическими группами макрофитов, несмотря на более низкий уровень накопления радионуклидов в их фитомассе, объясняется длительным выведением радионуклидов из круговорота веществ в водоеме.

\*\*

*В роботі проаналізовано особливості накопичення  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  вищими водними рослинами Київського водосховища з 1991 по 2008 р. Відзначається зниження питомої активності обох радіонуклідів, але в останні роки цей процес для  $^{137}\text{Cs}$  відбувається більш активно, що призводить до збільшення відношення  $^{90}\text{Sr}$  до  $^{137}\text{Cs}$ . Надходження радіонуклідів в екосистему правобережної частини Київського водосховища проходить інтенсивніше, що пов'язано зі зливом радіонуклідів чорнобильського походження з території водозбору р. Прип'ять.*

\*\*

*The peculiarities of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  accumulation by higher aquatic plants in Kiev water reservoir during 1991—2008 were analyzed. The decline of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  specific activity proceeds the last years, but the decrease of  $^{90}\text{Sr}$  takes place slower than  $^{137}\text{Cs}$ , that causes change of relation of  $^{90}\text{Sr}$  to  $^{137}\text{Cs}$  toward to decreasing this index. Entering of radionuclides into ecosystem of the right-bank part of Kiev water reservoir takes place more intensively, that is related to washout of radionuclides of Chernobyl origin from the Prip'yat River basin.*

\*\*

1. Белова М.А. Процессы бактериальной деструкции макрофитов в озерах различного типа: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. — Л., 1989. — 24 с.
2. Иванова И.Ю., Паньков И.В., Широкая З.О. Высшая водная растительность Киевского и Каховского водохранилищ после аварии на ЧАЭС // Гидробиол. журн. — 1997. — Т. 33, № 1. — С. 97—112.
3. Катанская В.М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. — Л.: Наука, 1981. — 187 с.
4. Клоков В.М., Смирнова Н.Н., Козина С.Я. и др. Фитоценозы высших водных растений Киевского водохранилища в условиях интенсивного за-

- грязнения радионуклидами // Гидробиол. журн. — 1993. — Т. 29, № 2. — С. 46—53.
5. Клоков В.М., Широкая З.О., Паньков И.В. и др. Накопление радионуклидов высшими водными растениями и структура их зарослей в Припятском отроге Киевского водохранилища // Там же. — 1993. — Т. 29, № 5. — С. 61—72.
  6. Кленус В.Г. Визначення вмісту специфічних речовин радіаційної дії в гідробіонтах різного трофічного рівня. Розділ II. Методи визначення характеристик основних абіотичних компонентів водних екосистем // Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод / За ред. В.Д. Романенко. — К.: ЛОГОС, 2006. — С. 321—326.
  7. Кузьменко М.І., Романенко В.Д., Деревець В.В. та ін. Вплив радіонуклідного забруднення на гідробіонти зони відчуження. — К.: Чорнобильінтерінформ, 2001. — 318 с.
  8. Олейник Г.Н., Якушин В.М. Изучение деструкции органического вещества высших водных растений на лабораторных моделях водотоков // Гидробиол. журн. — 1985. — Т. 20, № 1. — С. 20—27.
  9. Олейник Г.Н., Якушин В.М., Цапина Е.Н. Влияние разложения высших водных растений на содержание в воде органического вещества // Водн. ресурсы. — 1988. — № 2. — С. 135—143.
  10. *Определитель* высших растений Украины / Под. ред. Ю.Н. Прокудина. — Киев: Наук. думка, 1987. — 548 с.
  11. Паньков И.В., Волкова Е.Н., Широкая З.О. Радиозэкологические исследования в зоне литорали Киевского водохранилища до и после аварии на Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. — 1993. — Т. 29, № 3. — С. 100—109.
  12. Паньков И.В., Волкова Е.Н., Широкая З.О. и др. Радиозэкологические исследования фитоценозов Киевского водохранилища // Гидробиол. журн. — 1997. — Т. 33, № 2. — С. 76—88.
  13. Романенко В.Д., Кузьменко М.И., Евтушенко Н.Ю. и др. Радиоактивное и химическое загрязнение Днепра и его водохранилищ после аварии на Чернобыльской АЭС. — Киев: Наук. думка, 1992. — 194 с.
  14. *Состояние* гидробиоценозов водохранилища-охладителя Игналинской АЭС в предпусковой период // Теплоэнергетика и окружающая среда. — Вильнюс: Мокслас, 1987. — 176 с.
  15. Широкая З.О. Накопичення радіонуклідів вищими водяними рослинами дніпровських водоймищ: Автореф. дис. ... канд. біол. наук. — К., 1995. — 25 с.
  16. Широкая З.О., Кленус В.Г., Каглян А.Е. и др. Особенности радионуклидного загрязнения растений верхней части правобережья Киевского водохранилища // Радиация и экосистемы: Материалы междунар. науч. конф., Гомель, 16—17 окт. 2008 г. — Гомель, 2008. — С. 112—115.