14. Новоселов Г.М., Литвинский Л.Л., Мурзин А.В. Моделирование сечений и определение средних резонансных параметров ядер из экспериментов по пропусканию фильтрованных нейтронов: Препринт КИЯИ-89-25, 1989. 20 с.
15. Лукьянов А.А. Структура нейтронных сечений, М.: Атомиздат, 1978.
16. Mughabghab S. Neutron Cross Sections, v. 1, pt B Neutron Resonance Parameters and Thermal Cross Sections, Academic Press, INC, 1984.
17. Кононов В.Н., Юрлов Б.Д., Мантуров Г.Н. и др. Анализ средних сечений радиационного захвата быстрых нейтронов ядрами In, Ta, Au и нечетными изотопами европия и самария. — В кн.: Нейтронная физика. М., ЦНИИатоминформ, 1977, т. 2, с. 211—214.
18. Кузнецова Л.В., Попов А.Б., Самосват Г.С. Упругое рассеяние промежуточных нейтронов ядрами Mo-92, Mo-94, Dy, Er, Ta, W, Re и U-238. — Там же, 1988, т. 2, с. 258—262.
19. Popov A.B., Samosvat G.S. Preprint JINR-E3-85-226, 1985. 6 p.
20. Попов А.Б., Самосват Г.С. Дифференциальные сечения упругого рассеяния килоэлектронвольтных нейтронов ядрами с нечетными А. — Ядерная физика, 1987, т. 46, с. 1522—1525.
21. Литвинский Л.Л., Вертебный В.П., Либман В.А., Мурзин А.В. Нейтронные сечения и средние резонансные параметры ^{238}U при энергии нейтронов 55 и 144 кэВ. — Атомная энергия, 1987, т. 62, вып. 3, с. 192—193.

Поступила в Редакцию 16.12.93

УДК 621.039

СОДЕРЖАНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ЦИМЛЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

Бессонов О.А. (НИИ биологии РГУ), Давыдов М.Г., Марескин С.А., Малаева Т.Ю., Страдомская Е.А. (НИИ физики РГУ, Центр РЭТ)

Донные отложения являются накопителем почти всех искусственных и многих естественных радионуклидов и играют существенную роль в очищении водных экосистем [1]. Между содержанием радионуклидов в воде и донных отложениях устанавливается равновесие, при котором содержание некоторых естественных радионуклидов в 1—10 тыс. раз выше, чем в воде [2], а содержание ^{137}Cs распределяется в пресноводном водоеме так, что в биомассе (0,1% по массе) его активность составляет 4% общей активности, в воде (85% по массе) — 6%, в грунте (15% по массе) — 90% [1]. Искусственные радионуклиды, в том числе и изотопы цезия, попадая в водоем, включаются в биологические процессы и сравнительно быстро осаждаются на дно [3].

Особый интерес к изучению содержания радионуклидов в Цимлянском водохранилище вызван необходимостью оценки степени загрязнения ими этого крупного и важного водоема юга России в результате аварии на Чернобыльской АЭС. Кроме того, одновременно с ними можно определить в донных отложениях и естественные радионуклиды, поскольку это может дать информацию о геохимических процессах и осадконакоплении в водоеме [1—4].

Экспериментальная часть. Для рекогносцировочного обследования Цимлянского водохранилища в 1990 г. общепринятыми способами было отобрано 75 проб донных отложений и 45 проб почв в пределах водосбора. Методики отбора проб и их радионуклидного анализа подобны использованным в работах [5—7]. γ-Спектрометрические измерения проводили на аттестованной радиометрической установке на базе Ge(Li)—детектора ДГДК-80 в геометрии Маринелли с сосудами объемом 1 л и Дента с сосудами объемом 0,1 л.

Обсуждение результатов. Все пробы донных отложений по содержанию ^{40}K можно разделить на три группы: первая группа — ≤100 Бк/кг (~10 проб), вторая — 100—450 Бк/кг (~45%), третья — 450—800 Бк/кг (~45%). Первая группа образцов содержит преимущественно биологический материал и известняки, вторая — пески,

третья — глины. Подобную классификацию подтверждают и данные по отношению содержания ^{40}K к содержанию ^{226}Ra и ^{228}Ac. Для первой группы эти отношения малы: A(K)/A(Ra)~2,7 и A(K)/A(Ac)~9,4, второй по 15—16, третьей наибольшие: 12—16,5 и 18—19,5 соответственно. Содержание ^{226}Ra и ^{228}Ac возрастает от первой к третьей группе. Образцы второй и третьей группы отобраны в прибрежных районах. Их материал связан преимущественно с наносами.

В 25% проб определено содержание ^{234m}Pa и равновесного с ним ^{234}Th. В этих пробах независимо от содержания ^{234m}Pa (в диапазоне 10—1700 Бк/кг) выполнялось соотношение ^{226}Ra: ^{214}Pb: ^{214}Bi = 1:1:1, т.е. в пределах ошибок измерения наблюдается радиоактивное равновесие между ними. Это говорит о том, что на границе раздела вода — осадки нет дисбаланса ^{222}Rn либо он относительно мал при большой мощности осадка. Кроме того, отношение ^{234}Th:^{226}Ra возрастает от 2 до 50 с ростом содержания ^{234}Th, т.е. радиоактивное равновесие в ряду ^{234}Th — ^{226}Ra нарушается и тем больше, чем больше в осадках ^{234}Th. Это связано с возрастающей ролью биогенных процессов, с выходом радия в воду (в восстановительную среду) и удержанием урана в осадках.

Для 75% проб, в которых не обнаружен ^{234m}Pa, отношение ^{226}Ra:^{214}Pb: ^{214}Bi широко варьирует, причем радиоактивное равновесие отмечено только в 20—25% случаев. Для остальных проб нарушение равновесия может быть связано с эксхаляцией ^{222}Rn из поверхностного слоя относительно маломощных осадков. Она должна быть тем больше, чем тоньше слой осадка (толщину осадка характеризует относительное содержание ^{226}Ra). Действительно, с уменьшением содержания ^{226}Ra число случаев нарушения равновесия увеличивается до 50—100%.

Для большинства проб (85%) удельная активность ^{228}Ac не превышала 10—50 Бк/кг, причем отношение ^{228}Ac:^{212}Pb:^{208}Tl, равное 1:1:1, наблюдалось в 90% случаев. Наличие радиоактивного равновесия в этих случаях связано с процессами, в результате которых ^{232}Th попадает в водоемы (преимущественно с обломочным материалом и взвешенными частицами, на которых он сорбирован), и малой ролью эксхаляции торона (^{220}Rn) из отложений в водную толщу. Процессы эксхаляции торона (уменьшение содержания ^{212}Pb и ^{208}Tl в отложениях относительно содержания в них ^{228}Ac) начинают играть роль только для самых маломощных слоев отложений (~10% случаев).

При исследовании содержания искусственных радионуклидов в донных отложениях Цимлянского водохранилища наибольший интерес представляют данные об удельной активности ^{134,137}Cs. Согласно результатам γ-спектрометрических измерений удельная активность ^{137}Cs в пробах донных отложений составляет в среднем 32±3 Бк/кг (максимальная 65±5 Бк/кг). По данным независимых измерений, проведенных до 1986 г., $A(^{137}\text{Cs}) = 0{,}6 - 0{,}8$ Бк/кг (цезий глобального происхождения), после 1986 г. $A(^{137}\text{Cs}) = 6 - 24$ Бк/кг (определено по ограниченному числу проб в районе Волгодонска). Очевидно резкое возрастание удельной активности ^{137}Cs после аварии на Чернобыльской АЭС.

В большинстве проб (75%), в которых выявлен ^{137}Cs (17±2 Бк/кг), ^{134}Cs не обнаружен. В остальных пробах содержано ^{134}Cs и ^{137}Cs составляют в среднем 8±2 и 62±2 Бк/кг соответственно. Поскольку вклад глобального цезия мал, по этим данным можно определить отношение $A(^{134}\text{Cs})/A(^{137}\text{Cs}) = 0{,}13\pm0{,}02$. В момент аварии это отношение для активных выбросов было равно 0,5 (по результатам измерения коэффициента фракционирования для аэрозолей и почв) [5]. Аналогичное значение

(0,47±0,01) получено в июне 1986 г. для воды Черного моря [8]. Это отношение должно сохраняться и для донных отложений в любых загрязненных районах, так как основная часть изотопов цезия, попавших в первые дни после аварии в водные экосистемы из атмосферы, быстро перешла в донные отложения. Поэтому с учетом распада обоих изотопов за время t, прошедшее с момента аварии до момента измерения, можно записать:

$$\frac{A_t(^{134}\mathrm{Cs})}{A_t(^{137}\mathrm{Cs})} = \frac{A_0(^{134}\mathrm{Cs})\exp(-\lambda_{134}t)}{A_0(^{137}\mathrm{Cs})\exp(-\lambda_{137}t)} = 0{,}5\frac{\exp(-\lambda_{134}t)}{\exp(-\lambda_{137}t)}.$$

Так как в нашем случае t = 4,5 года, $A_t(^{134}\mathrm{Cs})/A_t(^{137}\mathrm{Cs})$ = 0,12, что в пределах ошибок измерений совпадает с указанным значением, а также с отношением $A(^{134}\mathrm{Cs})/A(^{137}\mathrm{Cs})$ = 0,13 для 1990 г. [9]. Поэтому очевидно, что почти весь ^{137}Cs в Цимлянском водохранилище — следствие аварии на Чернобыльской АЭС.

Загрязнение дна водохранилища радионуклидами оценим условно, приняв в качестве средней плотности отложений ρ = 1,2 г/см^3, средней мощности слоя h = 15 см. (С учетом этого 1 Ки/км^2 соответствует 185 Бк/кг). При общей площади загрязнения дна около 2,7 тыс.км^2 суммарный запас ^{137}Cs в водохранилище оценивается ~500 Ки. Вследствие малого числа отобранных проб более точной оценки запаса и более детальной картины получить невозможно. Тем не менее формы пятен загрязнения ≥0,2 Ки/км^2 для ^{137}Cs и ≥0,05 Ки/км^2 для ^{134}Cs характерны. Во-первых, места наибольшего загрязнения почв (грунтов) приурочены к районам впадения р. Донская Царица (среднее 0,15, максимальное 0,3 Ки/км^2 по ^{137}Cs), р. Аксай Курмоярский (0,12 и 0,3 Ки/км^2 соответственно), район Тормосин (0,15 и 0,2 Ки/км^2 соответственно). Во-вторых, места наибольшего загрязнения донных отложений, как правило, связаны с районами впадения рек Дон, Донская Царица, Цимла, Соленая и др. Это позволяет предположить, что запасы ^{137,134}Cs на дне водохранилища формировались не столько за счет выпадений на его зеркало в первые недели после аварии, сколько за счет стоков рек, впадающих в водохранилище. Как показывают данные работы [9], для Дуная концентрация искусственных радионуклидов (^{90}Sr, ^{137}Cs) резко повышалась в результате смыва с прилегающей территории не только сразу после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., но и в последующие годы, особенно при благоприятных метеорологических и гидрологических условиях (дожди, таяние снегов, паводки). По ходу течения реки искусственные радионуклиды, особенно ^{137}Cs, в результате сорбционных процессов быстро переходили из воды в донные отложения и с ними выносились вниз по течению. Подобные процессы происходили и на загрязненных водосборах, расположенных севернее Цимлянского водохранилища (бассейны рек Дон, Цимла и др.). Наибольший вклад в запас ^{134,137}Cs в Цимлянское водохранилище дали стоки Дона и в меньшей степени Цимлы и др.

Кроме выноса ^{134,137}Cs по руслам рек имели значение процессы их смыва с земной поверхности паводковыми водами в районе самого водохранилища. Не исключено, что процесс накопления ^{137}Cs в водохранилище этими путями не завершен. Возможно также перераспределение ^{137}Cs по дну водохранилища как вследствие естественных процессов, так и в результате деятельности человека. Можно предполагать увеличение со временем загрязнения в районе Волгодонска и Цимлянска. Это подтверждается независимо полученными данными о массопереносе минерального вещества от устья Среднего Дона (район Калача-на-Дону) к нижнему бьефу Цимлянской плотины. Около 15% осадочного вещества, поставляемого в водоем Средним Доном, мигрирует в приплотинный плес.

Если принять по результатам изучения последствий аварии на Чернобыльской АЭС в наиболее загрязненных районах, что в выпадениях отмечалась «цезиевая аномалия», то $A(Cs)/A(Sr) \cong 5$. (По другим данным в речной воде это отношение $\cong 10$). Тогда запас ^{90}Sr в водохранилище можно оценить ~100 Ки.

Таким образом, Цимлянское водохранилище является по существу открытым источником загрязнения ^{137}Cs и ^{90}Sr (с запасом ориентировочно 500 и 50—100 Ки соответственно) со сложным распределением загрязнения по дну, которое может изменяться во времени как по значению, так и характеру.

Полученные результаты позволяют подготовить более детальное систематическое радиоэкологическое обследование Цимлянского водохранилища.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Математическое моделирование миграции радионуклидов в водных экосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1986. 152 с.
2. Батурин Г.Н. О содержании урана в осадках Каспийского моря. — Атомная энергия, 1966, т. 21, вып. 66, с. 515— 516.
3. Assesing the Impact of Deep Sea Disposal of Low Level Radioactive Waste in Living Marine Resources. Techn. Rep. ser. № 288. Vienna: IAEA, 1988, 128 p.
4. Geochemical Exploration for Uranium. Techn. Rep. Ser. № 284. Vienna: IAEA, 1988, 96 p.
5. Израэль Ю.А. Экологические последствия радиоактивного загрязнения природных сред в районе аварии на Чернобыльской АЭС. — Атомная энергия, 1988, т. 64, вып. 1, с. 28—40.
6. Чернобыль. Радиоактивное загрязнение природных сред. Под ред. Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 296 с.
7. Международный чернобыльский проект. Техн. докл. Вена: МАГАТЭ, 1992. 740 с.
8. Никитин А.И., Мединец В.И., Чумичев В.Б. и др. Радиоактивное загрязнение Черного моря вследствие аварии на Чернобыльской АЭС по состоянию на октябрь 1986 г. — Атомная энергия, 1988, т. 65, вып. 2, с. 134—137.
9. Гедеонов Л.И., Гритченко З.Г., Иванова Л.М. и др. Радионуклиды стронция и цезия в воде низовья Дуная в 1985—1990 гг. — Там же, 1993, т. 74, вып. 1, с. 59—63.

Поступила в Редакцию 10.02.94

УДК 621.039.584

МЕТОДИКА ДИАГНОСТИКИ ПРОТЕЧКИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ПЕРВОГО КОНТУРА В КОТЛОВУЮ ВОДУ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ АЭС С ВВЭР-440 И -1000

Иванов Е.А., Пырков И.В., Хамьянов Л.П. (ВНИИАЭС)

Как следует из работы [1], если в течение времени наблюдения расхода котловой воды парогенератора через фильтры очистки $G_{пр}$ и протечки теплоносителя первого контура в котловую воду G постоянны, а удельная активность радионуклидов в теплоносителе первого контура и продувочной воде является стационарной случайной функцией, то между указанными величинами существует связь $\widetilde{G} = (\lambda + \widetilde{G}_{пр} + K_p^в \widetilde{G}_{пар}) A_2/A_1$, где $\widetilde{G}_{пр} = G_{пр}/M$; $\widetilde{G} = G/M$; $\widetilde{G}_{пар} = G_{пар}/M$; M — масса воды в одном парогенераторе, т; $G_{пр}$ — расход продувочной воды на очистку, т/ч; $G_{пар}$ — паропроизводительность парогенератора, т/ч; G — протечка теплоносителя первого контура в котловую воду, т/ч; A_1 — удельная активность радионуклида в теплоносителе первого контура, Ки/кг; A_2 — удельная активность радионуклида в котловой воде, Ки/кг; λ — постоянная распада радионуклида, $ч^{-1}$; $K_p^в$ — видимый коэффициент распределения радионуклида между паром и водой, $K_p^в \approx K_p + \omega$; K_p —