

УДК [594.38:575.2](28)(477.41)

Д. И. Гудков¹, Е. В. Дзюбенко¹, А. Б. Назаров²,
А. Е. Каглян¹, В. Г. Кленус¹

**ПРЕСНОВОДНЫЕ МОЛЛЮСКИ В ЗОНЕ
ОТЧУЖДЕНИЯ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ АЭС: ДИНАМИКА
СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ, ДОЗОВЫЕ
НАГРУЗКИ, ЦИТОГЕНЕТИЧЕСКИЕ И
ГЕМАТОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Проанализированы видоспецифичность и динамика накопления ^{90}Sr , ^{137}Cs , а также трансурановых элементов у двустворчатых и брюхоногих пресноводных моллюсков зоны отчуждения Чернобыльской АЭС в период 1995—2008 гг. Приведены результаты оценки дозовых нагрузок, частоты хромосомных aberrаций и анализа состава гемолимфы у прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis*). Мощность поглощенной дозы регистрировали в диапазоне 0,3—85,0 мкГр/ч. В замкнутых водоемах отмечена повышенная частота хромосомных aberrаций в тканях эмбрионов (до 27%), а также изменение гематологических показателей у взрослых особей моллюсков.

Ключевые слова: зона отчуждения Чернобыльской АЭС, пресноводные моллюски, ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , дозовые нагрузки, хромосомные aberrации, состав гемолимфы.

Пресноводные моллюски — широко используемый объект радиэкологических и радиобиологических исследований акваторий, испытывающих влияние предприятий ядерного топливного цикла. Благодаря способности накапливать практически все радионуклиды, присутствующие в среде обитания, и высокой биомассе моллюскам принадлежит важная роль в процессах аккумуляции и биоседиментации радиоактивных веществ в пресноводных экосистемах, что позволяет рассматривать этих беспозвоночных, с одной стороны, как виды-индикаторы загрязнения окружающей среды радионуклидами, а с другой — как организмы, активно участвующие в процессах перераспределения радиоактивных веществ в гидробиоценозах.

Водные экосистемы в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС (далее зона отчуждения) по-прежнему характеризуются высоким уровнем радионуклидного загрязнения со сложной динамикой физико-химических форм, влияющих на скорость миграции, биологическую доступность и интенсивность накопления радионуклидов компонентами экосистем [1, 3, 6, 7, 10]. Увеличение концентрирования радиоактивных веществ биотой может обу-

© Гудков Д. И., Дзюбенко Е. В., Назаров А. Б., Каглян А. Е., Кленус В. Г., 2010

словливать критические дозовые нагрузки на организмы, обладающие высокими коэффициентами накопления радионуклидов и/или обитающие в экологических зонах с повышенным уровнем внешнего облучения. Основным дозообразующим радионуклидом для моллюсков зоны отчуждения в настоящее время является ^{90}Sr — химический аналог кальция, накапливающийся в раковинах и в значительных количествах присутствующий в донных отложениях водоемов.

Несомненно, одной из важнейших радиоэкологических проблем, связанных с аварией на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС), остается оценка повреждений биосистем в результате интенсивного радионуклидного загрязнения и обусловленного этим радиационного воздействия, которое в зоне отчуждения приобрело хронический характер. За минувшие 23 года исследователями из различных стран и научных учреждений проведен значительный объем работ, посвященных медико-биологическим последствиям аварии. По вполне понятным и, в какой-то мере, оправданным причинам, основным объектом этих исследований был человек. При этом происходило существенное развитие и совершенствование методов оценки дозовых нагрузок, а также эффектов радиационного воздействия у лиц, подвергшихся облучению. В значительно меньшей степени внимание радиобиологов и радиоэкологов было уделено другим, как предполагалось, менее радиочувствительным представителям животного и растительного мира, в частности водным организмам. Гидробионты в водоемах зоны отчуждения, обитающие в различных условиях формирования повышенных доз облучения, как и прежде, остаются недостаточно изученным в этом отношении объектом. Во всяком случае, немногочисленные публикации, которые существуют в данной области, в большинстве не подкреплены данными дозиметрии, что осложняет научно-обоснованное сопоставление наблюдаемых (или отсутствующих) эффектов с величиной мощности поглощенной дозы.

Главными задачами представленных исследований были следующие: анализ видоспецифичности и динамики концентрирования ^{90}Sr , ^{137}Cs и некоторых трансурановых элементов пресноводными моллюсками; оценка дозовых нагрузок за счет внешних источников облучения и радионуклидов, инкорпорированных в тканях; анализ частоты хромосомных aberrаций в период эмбрионального развития и изменение состава гемолимфы взрослых особей моллюсков в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения.

Материал и методика исследований. Основные исследования выполняли в период 1997—2008 гг. в оз. Азбучин, Яновском (Припятском) затоне, водоеме-охладителе (ВО) ЧАЭС, озерах Красненской поймы р. Припяти — Глубоком и Далекое-1, а также реках Уж (с. Черевач) и Припять (г. Чернобыль). Для некоторых водоемов приведены также данные за 1995 и 1996 гг. В качестве контрольных водоемов для сравнительных цитогенетических и гематологических исследований использовали ряд озер, расположенных в г. Киеве и его окрестностях — Вырлица, Голосеевское, Опечень, Пидбирна.

Анализ содержания радионуклидов проводили у моллюсков следующих видов: прудовик обыкновенный (*Lymnaea stagnalis* L.), прудовик болотный (*Stagnicola palustris* L.), прудовик овальный (*Radix ovata* L.), катушка роговид-

ная (*Planorbarius corneus* L.), живородка (*Viviparus viviparus* L.), дрейссена (*Dreissena polymorpha* Pall. и *D. bugensis* Andr.), перловица обыкновенная (*Unio pictorum* L.), перловица клиновидная (*Unio tumidus* Phil.), беззубка обыкновенная (*Anodonta cygnea* L.).

Измерение удельной активности ^{137}Cs в пробах выполняли при помощи γ -спектрометрического комплекса в составе детектора PGT IGC-25 (Франция), анализатора Nokia LP 4900 B (Nokia, Финляндия), источника низковольтного питания — крейт NIM BIN, усилителя NU 8210 (Elektronikus Merokeszulekek Gyara, Венгрия) и свинцовой защиты толщиной 100 мм. Для определения удельной активности ^{90}Sr использовали низкофоновый β -радиометр NRR-610 (Tesla, Чехия). Определение содержания ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в электролитически приготовленных препаратах осуществляли с использованием α -спектрометрического тракта, в составе камеры с детектором, системы электропитания, вакуумной системы и анализатора импульсов NUC-8192 (Elektronikus Merokeszulekek Gyara, Венгрия), собранного из электронных блоков в составе NIM. Для измерения содержания ^{241}Am использовали рентгено-спектрометрический тракт в составе рентгеновского детектора EG&G Ortec LOAX-51370/20 CFG-SU-GMX (EG&G Ortec, США) и анализатора Nokia LP 4900 B.

Измерение удельной активности радионуклидов у моллюсков выполняли без отделения мягких тканей от раковины. Результаты измерений приведены в беккерелях на килограмм (Бк/кг) массы при естественной влажности. Способность моллюсков аккумулировать радионуклиды определяли как коэффициент концентрирования (K_k), который рассчитывали отношением удельной активности радионуклидов в тканях моллюсков к среднегодовой удельной активности воды мест обитания и выражали в л/кг.

Мощность внешней дозы γ -излучения измеряли при помощи дозиметров ДКС-01 и СРП-68-03 (модель для измерения дозы излучения в жидких средах). Оценку мощности поглощенной дозы от инкорпорированных в тканях и содержащихся в воде ^{90}Sr , ^{137}Cs , 238 , 239 , ^{240}Pu и ^{241}Am проводили по методике [11] с использованием дозовых пересчетных коэффициентов (dose conversion coefficients) для брюхоногих и двустворчатых моллюсков. Погрешность оценки дозовых нагрузок не превышала 30%.

Для цитогенетических исследований использовали эмбрионы прудовика обыкновенного (*Lymnaea stagnalis*), преимущественно на стадии трахофоры и велигера. Фиксацию материала осуществляли на месте отбора проб смесью этилового спирта и ледяной уксусной кислоты (3:1). Окраску цитологических препаратов выполняли 1%-ным ацетоорсеином. Анализ частоты aberrаций хромосом в препаратах проводили в клетках на стадиях анафазы и телофазы митоза [8]. Гематологические исследования проводили с использованием мантийной жидкости моллюсков, фиксированной раствором Карнуа. Препараты окрашивали азур-эозином по Романовскому — Гимза [12]. Анализ соотношения различных групп гемоцитов и их классификацию выполняли по методике [5].

Результаты исследований и их обсуждение

Видоспецифичность и уровни накопления радионуклидов. Значения удельной активности ^{90}Sr у моллюсков оз. Глубокого за период исследований регистрировали в пределах 5000—200 000 (73700) Бк/кг. Средняя удельная активность радионуклида для 5 видов брюхоногих моллюсков была в пределах 9500—104 000 Бк/кг, при этом минимальные значения отмечены для прудовиков овального и обыкновенного. Значительно большая удельная активность, по сравнению с брюхоногими моллюсками, отмечена у перловицы обыкновенной — 170 000 Бк/кг. Содержание ^{137}Cs у моллюсков оз. Глубокого регистрировали в диапазоне 1400—30 000 (7600) Бк/кг, при этом средняя удельная активность радионуклида для различных видов брюхоногих моллюсков находилась в сравнительно узком интервале 2000—6300 Бк/кг. Величина этого показателя у перловицы обыкновенной достигала 27 000 Бк/кг.

В оз. Далеком-1 содержание ^{90}Sr у четырех видов моллюсков было в пределах 13 000—40 000 (26 900) Бк/кг. Содержание ^{137}Cs регистрировали в диапазоне 210—2800 (2200) Бк/кг. Средние значения удельной активности ^{90}Sr для различных видов моллюсков были в пределах 24 000—32 000, а ^{137}Cs — 730—1650 Бк/кг. Наименьшие значения средней удельной активности как ^{90}Sr , так и ^{137}Cs , отмечены для прудовика обыкновенного, а наибольшие — у перловицы обыкновенной.

В оз. Азбучин анализировали 5 видов брюхоногих моллюсков. Содержание ^{90}Sr у представителей этой группы регистрировали в диапазоне 5300—110 000 (52 500) Бк/кг. Минимальные средние значения удельной активности радионуклида отмечены у прудовика овального, а максимальные — у прудовика болотного. Содержание ^{137}Cs у моллюсков оз. Азбучин регистрировали в диапазоне 400—6220 (2900) Бк/кг, при этом средняя удельная активность радионуклида для исследованных видов была в пределах 1700—4700 Бк/кг, с минимальными и максимальными значениями соответственно у прудовика обыкновенного и прудовика болотного.

В Яновском затоне за период исследований удалось отобрать только один вид моллюсков — прудовика обыкновенного. Содержание ^{90}Sr у этого вида в период исследований составило 6300—18 000 (10 700) Бк/кг, а ^{137}Cs — 120—520 (430) Бк/кг. Двустворчатых моллюсков в пунктах отбора проб в Яновском затоне, несмотря на обширные мелководные песчаные отмели, сформировавшиеся после отделения затона от р. Припяти широкой намывной дамбой, обнаружить не удалось.

В водоеме-охладителе ЧАЭС анализировали содержание радионуклидов у четырех видов двустворчатых моллюсков. Содержание ^{90}Sr здесь регистрировали в пределах 380—2400 (1400) Бк/кг. Значения средней удельной активности для исследуемых видов были в сравнительно узком диапазоне 1100—1700 Бк/кг, с минимальными показателями у беззубки обыкновенной, а максимальными — у дрейссены. Содержание ^{137}Cs у моллюсков водоема-охладителя ЧАЭС регистрировали в диапазоне 120—2200 (870) Бк/кг. Средние значения удельной активности расположены в интервале

670—1000 Бк/кг, с минимальными и максимальными значениями соответственно у беззубки обыкновенной и перловицы клиновидной. Брюхоногие моллюски в пунктах отбора проб в охладителе ЧАЭС в течение всего периода исследований не обнаружены.

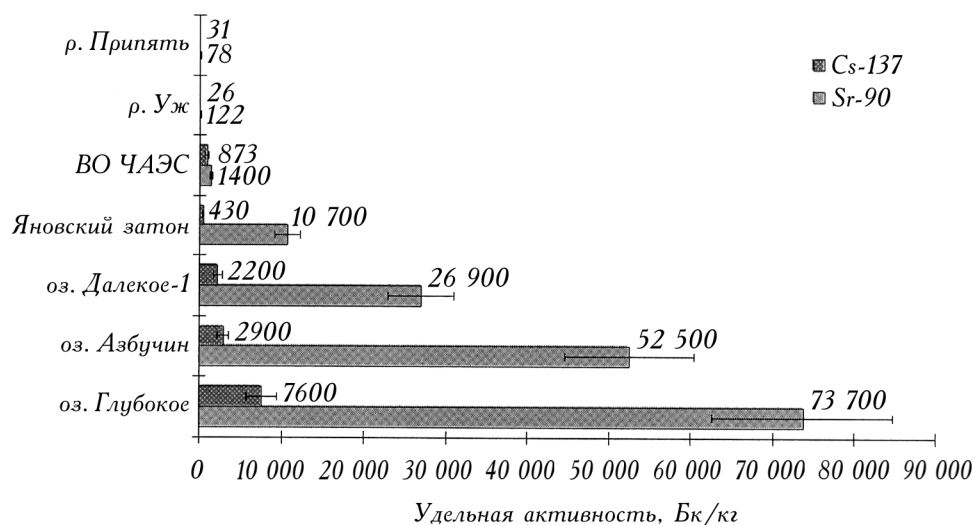
Анализ содержания радионуклидов в р. Припяти проводили с использованием двух видов брюхоногих моллюсков и четырех видов двустворчатых. Содержание ^{90}Sr у моллюсков за исследуемый период было в диапазоне 19—200 (78) Бк/кг. Средние значения удельной активности радионуклида были в пределах 60—90 Бк/кг, с минимальными значениями у живородки и максимальными — у перловицы обыкновенной. Содержание ^{137}Cs у моллюсков р. Припяти регистрировали в диапазоне 10—78 (31) Бк/кг. При этом средние значения удельной активности радионуклида были в пределах 20—50 Бк/кг с минимальными и максимальными значениями соответственно у живородки и перловицы обыкновенной, как и для удельной активности ^{90}Sr .

В р. Уж содержание радионуклидов у моллюсков, по сравнению с р. Припятью, отличалось несущественно. Здесь анализировали три вида брюхоногих и два вида двустворчатых моллюсков. Содержание ^{90}Sr регистрировали в диапазоне 60—370 (122) Бк/кг. Средние значения удельной активности для различных видов были в пределах 80—180 Бк/кг, с минимальными значениями у прудовика обыкновенного и максимальными — у перловицы обыкновенной. Содержание ^{137}Cs у моллюсков р. Уж регистрировали в диапазоне 9—75 (26) Бк/кг, при этом средние значения удельной активности радионуклида отмечены в пределах 20—35 Бк/кг, с минимальными значениями у живородки и максимальными — у перловицы обыкновенной.

Таким образом, наибольшие средние показатели удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs отмечены у моллюсков оз. Глубокого, затем следуют моллюски оз. Азбучин и оз. Далекое 1. Далее в ряду убывания удельной активности ^{90}Sr находятся моллюски Яновского затона и водоема-охладителя ЧАЭС, при этом содержание ^{137}Cs у моллюсков Яновского затона, несмотря на сравнительно высокие значения удельной активности ^{90}Sr , существенно меньше, чем у моллюсков охладителя ЧАЭС. Самым низким содержанием радионуклидов характеризуются моллюски из проточных водных объектов — рек Уж и Припять (рис. 1).

Количественные параметры удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у пресноводных моллюсков зоны отчуждения достаточно хорошо отражают уровень содержания радионуклидов в основных компонентах исследуемых водных экосистем, и в первую очередь, — в воде мест обитания беспозвоночных (табл. 1).

Определенного внимания заслуживает анализ соотношения удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у моллюсков и в воде исследуемых водоемов зоны отчуждения, а также сопоставление этих данных с катионным составом воды. Так, наименьшее отношение удельной активности ^{90}Sr к ^{137}Cs у моллюсков водоема-охладителя ЧАЭС по сравнению с таковым остальных полигонных водоемов может быть объяснено аномально высоким значением



1. Средние значения удельной активности радионуклидов у пресноводных моллюсков зоны отчуждения в период 1997—2008 гг., Бк/кг.

этого показателя в воде охладителя ЧАЭС, отражающимся на интенсивности накопления радионуклидов моллюсками. Однако, на наш взгляд, основной причиной повышенного содержания ^{137}Cs в тканях моллюсков охладителя, по сравнению, к примеру, с Яновским затоном, где содержание ^{90}Sr у моллюсков в 8 раз выше, является сравнительно низкое содержание в воде охладителя катионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, определяющее высокое соотношение $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$ и создающее благоприятные условия для аккумуляции ^{137}Cs (табл. 2).

Влияние катионного состава воды на соотношение удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у моллюсков также хорошо прослеживается на примере водоемов левобережья (озера Глубокое и Далекое-1) и правобережья р. Припяти (оз. Азбучин и Яновский затон), характеризующихся различным гидрохимическим и гидрологическим режимами. Так, несмотря на сравнительно высокое отношение $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$ в воде озер левобережной поймы, отношение радионуклидов у моллюсков ниже, чем в водоемах правобережья. На наш взгляд, основной причиной такого соотношения радионуклидов является более низкое отношение $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$ в воде Яновского затоны и оз. Азбучин, определяющее невысокую интенсивность концентрирования ^{137}Cs моллюсками.

На примере прудовика обыкновенного, как наиболее распространенного вида в исследуемых водоемах зоны отчуждения, нами были рассмотрены особенности накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs . Анализ расчетов показал, что средние значения $K_{\text{к}} ^{90}\text{Sr}$ находились в диапазоне 360—550 л/кг, что обуславливало различие между максимальными и минимальными значениями в 1,5 раза и позволило говорить о незначительном различии $K_{\text{к}} ^{90}\text{Sr}$ у прудовика обыкновенного в водоемах зоны отчуждения (рис. 2, а). Для ^{137}Cs наблюдается

1. Среднегодовое содержание радионуклидов в воде основных полигонных водоемов зоны отчуждения, Бк/л

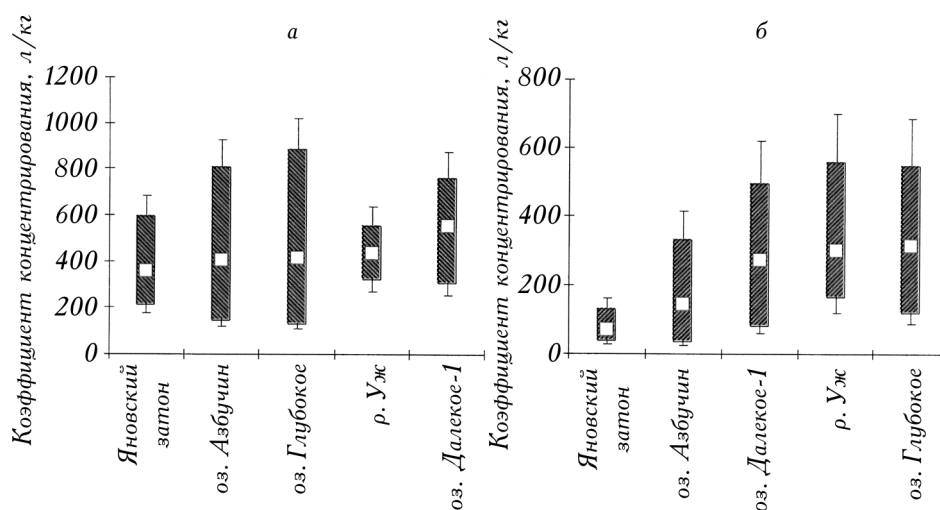
Годы	Яновский затон		Озеро Далекое-1		Водоем-охладитель ЧАЭС		Озеро Азбучин		Озеро Глубокое		Река Припять		Река Уж	
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs
1997	30	5,2	45	4,5	2,2	2,8	85	12,7	100	13,2	0,25	0,16	0,26	0,08
1998	35	4,3	50	3,4	1,8	3,1	120	17,2	120	14,0	0,30	0,14	0,32	0,14
1999	38	3,7	45	2,8	1,9	3,1	190	22,8	120	13,6	0,50	0,15	0,25	0,10
2000	49	2,8	48	1,7	1,7	2,7	133	13,0	103	7,8	0,22	0,11	0,16	0,10
2001	26	2,7	35	2,6	1,5	2,1	110	9,9	79	7,1	0,23	0,12	0,18	0,09
2002	23	3,2	29	2,0	1,4	2,1	52	5,6	74	7,2	0,17	0,05	0,08	0,05
2003	22	2,4	40	2,3	1,7	2,1	49	8,7	102	6,8	0,15	0,03	0,11	0,04
2004	19	2,8	55	2,2	1,6	1,8	56	6,7	135	6,2	0,18	0,03	0,17	0,04
2005	17	2,3	58	2,1	1,3	1,8	74	6,8	140	6,3	0,19	0,09	0,14	0,07
2006	16	2,2	×	×	1,5	1,6	61	6,3	160	3,6	0,16	0,07	0,13	0,07
2007	19	2,1	×	×	1,6	1,4	47	5,2	110	3,5	0,12	0,05	0,09	0,07
2008	11	3,2	×	×	2,2	1,4	37	4,8	95	3,7	0,10	0,03	0,10	0,04

Примечание. × — измерения не проводили.

2. Соотношение основных катионов и радионуклидов в воде и моллюсках зоны отчуждения

Водные объекты	Ca ²⁺ + Mg ²⁺ / Na ⁺ + K ⁺ в воде	⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs в воде	⁹⁰ Sr/ ¹³⁷ Cs у моллюсков
Оз. Далекое-1	1,9	16,1	12,2
Оз. Глубокое	2,0	11,0	9,7
Оз. Азбучин	1,4	8,2	18,1
Яновский затон	1,4	8,9	24,8
ВО ЧАЭС	3,4	0,7	1,6
Р. Припять	1,7	2,5	2,5
Р. Уж	1,6	2,4	4,7

несколько иная картина — средние значения K_k радионуклида находились в диапазоне 70—300 л/кг, что определяло разницу между максимальными и минимальными значениями более чем в 4 раза (рис. 2, б). Характерно, что минимальные средние значения отмечены в Яновском затоне и оз. Азбучин, катионный состав воды в которых отличается сравнительно высоким содержанием катионов Na⁺ и K⁺, что, как говорилось выше, определяет сравнительно низкую интенсивность накопления ¹³⁷Cs моллюсками.

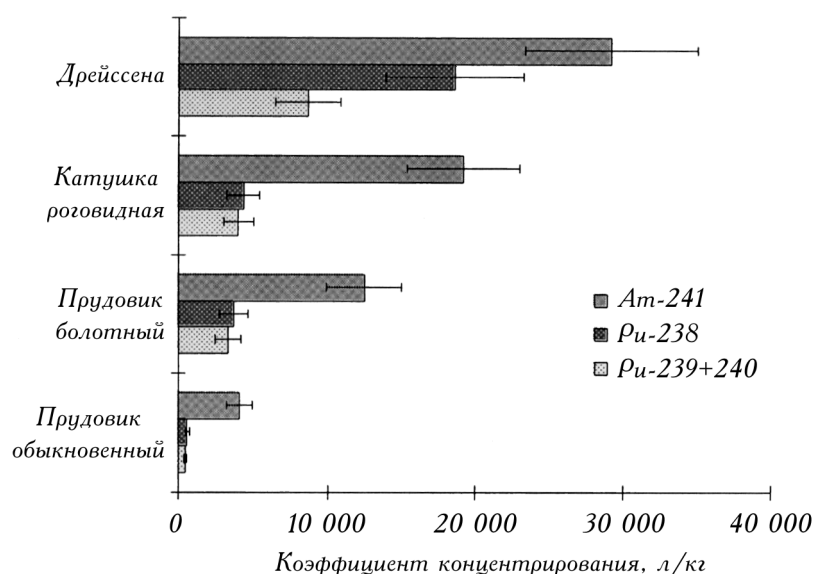


2. Диапазоны и средние значения K_k ^{90}Sr (а) и ^{137}Cs (б) у прудовика обыкновенного в водоемах зоны отчуждения.

Среднее содержание ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ в тканях моллюсков, обитающих в озерах Глубоком и Далекое-1, было следующим: минимальные значения отмечены для прудовика обыкновенного — соответственно 0,1 и 0,2 Бк/кг в оз. Далекое-1, 2,7 и 6,4 в оз. Глубоком. Более высокое содержание отмечено для прудовика болотного из оз. Глубокого — соответственно 14,0 и 36,0 Бк/кг. Максимальная активность среди брюхоногих моллюсков водоемов Красненской поймы зарегистрирована для катушки роговидной — соответственно 0,9 и 2,1 Бк/кг в оз. Далекое-1, 24,7 и 53,0 Бк/кг в оз. Глубоком. Дрейссена из водоема-охладителя ЧАЭС характеризовалась величинами удельной активности ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ соответственно 2,8 и 6,2 Бк/кг.

Содержание ^{241}Am в тканях прудовика обыкновенного было минимальным и регистрировалось в диапазоне 5—30 (15) Бк/кг в оз. Далекое-1 и 6—51 (27) Бк/кг в оз. Глубоком. Для прудовика болотного из оз. Глубокого отмечена более высокая концентрация — 75 Бк/кг. Максимальные значения зарегистрированы для катушки роговидной — 18—29 (24) Бк/кг в оз. Далекое-1 и 80—310 (170) Бк/кг в оз. Глубоком. Содержание ^{241}Am в тканях дрейссены из ВО ЧАЭС было около 8 Бк/кг (рис. 3).

Анализ видоспецифичности накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs показал, что двустворчатые моллюски, являющиеся облигатными фильтраторами и обладающие массивной раковинной, выступают более эффективными концентраторами радионуклидов по сравнению с брюхоногими моллюсками. Так, практически во всех исследуемых водоемах зоны отчуждения наибольшие значения K_k радионуклидов отмечены у перловицы обыкновенной. Различия в содержании ^{90}Sr , накапливающегося преимущественно в скелетных образованиях, обусловлены в первую очередь удельным вкладом раковины в общий вес моллюска. Наибольшие значения K_k ^{90}Sr отмечены у перловицы обыкновенной и дрейссены. Концентрирование ^{137}Cs также с большей эффективностью происходит у двустворчатых моллюсков, а у брюхоногих — находится практически на одном уровне (рис. 4).

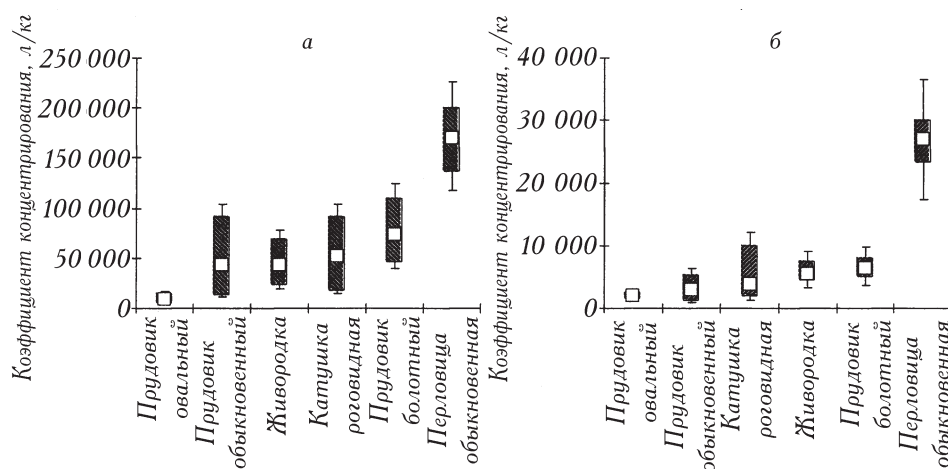


3. Средние значения K_k трансураниевых элементов у брюхоногих моллюсков в озерах Красненской поймы и дрейссены водоема-охладителя ЧАЭС.

Особенности морфологического строения и функционирования брюхоногих и двустворчатых моллюсков определяют различные величины K_k исследуемых радионуклидов для представителей различных групп. На примере прудовика обыкновенного из оз. Глубокого и дрейссены из водоема-охладителя ЧАЭС средние значения K_k можно расположить в ряду убывания следующим образом: прудовик обыкновенный — ^{241}Am (4120) > ^{238}Pu (590) > $^{239+240}\text{Pu}$ (450) > ^{90}Sr (412) > ^{137}Cs (310); дрейссена — ^{241}Am (29250) > ^{238}Pu (9200) > $^{239+240}\text{Pu}$ (8730) > ^{90}Sr (1100) > ^{137}Cs (350).

Динамика удельной активности радионуклидов. Одним из основных факторов, определяющих величину удельной активности радионуклидов в тканях гидробионтов, является содержание радионуклидов в воде мест обитания. В связи с этим, основные тенденции изменения удельной активности радионуклидов у пресноводных моллюсков в зоне отчуждения связаны в первую очередь с гидрологическим режимом водных объектов и динамикой содержания радиоактивных веществ в водных массах.

Исследования, выполненные в первые годы после аварии на ЧАЭС в зоне отчуждения показали, что в речных экосистемах распад короткоживущих радионуклидов, а также сравнительно быстрое естественное самоочищение абиотических компонентов вследствие гидродинамических процессов (особенно в паводки и периоды весенних половодий) обусловили достаточно быстрое снижение удельной активности основных радионуклидов у гидробионтов, с последующей относительной стабилизацией на определенном уровне по мере уменьшения поступления радиоактивных веществ в результате смыва с водосборных территорий и притока из более загрязненных водных объектов. В последнее десятилетие слабая тенденция снижения

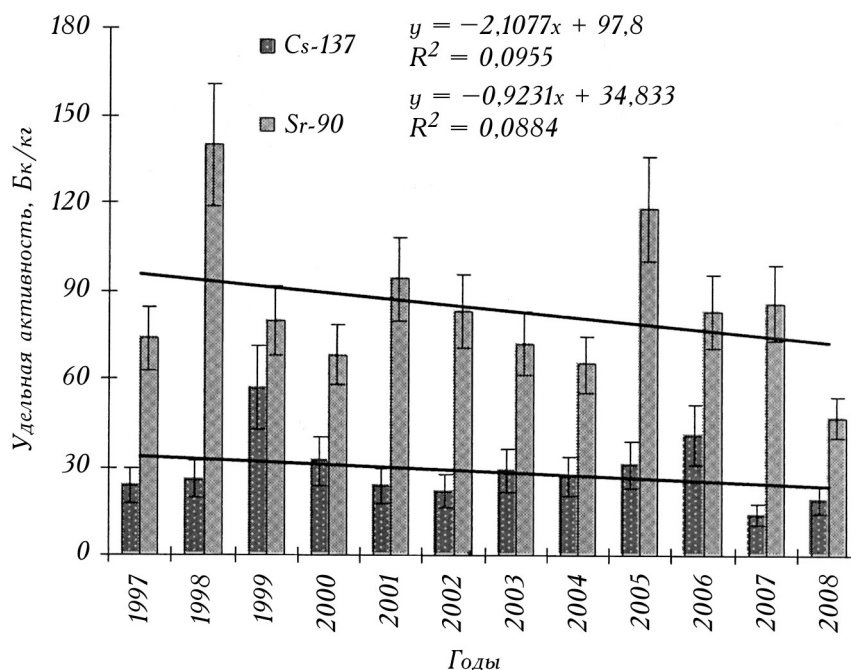


4. Средние значения и диапазоны удельной активности ^{90}Sr (а) и ^{137}Cs (б) у моллюсков оз. Глубокого.

удельной радиоактивности в воде речных экосистем зоны отчуждения продолжает сохраняться, отражаясь и на удельной активности радионуклидов в тканях моллюсков (рис. 5).

Иная обстановка сложилась в замкнутых водоемах зоны отчуждения, имеющих ограниченный водообмен и значительный запас радионуклидов, депонированных в донных отложениях. В связи с этим первоначальный этап быстрого снижения удельной радиоактивности в воде замкнутых водоемов после аварии на ЧАЭС был в значительно большей степени растянут во времени, по сравнению с речными экосистемами, и определялся преимущественно скоростью седиментационных процессов перехода радионуклидов в донные отложения. Последующее снижение удельной активности радионуклидов в воде естественных замкнутых водоемов во многом зависело от степени преобладания процессов выноса радионуклидов в результате гидравлической связи в речные системы и биоседиментации над вторичными процессами поступления радионуклидов в водные экосистемы — интенсивностью обмена мобильных форм радионуклидов между донными отложениями и водными массами, а также внешним смывом с территории водосбора.

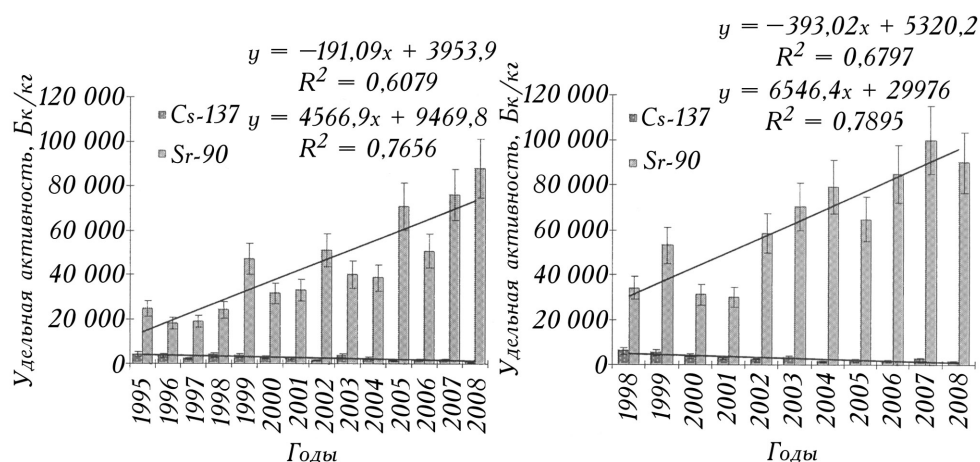
Как показали собственные исследования [1, 2, 4, 13], экосистемы замкнутых водоемов правобережья р. Припяти — оз. Азбучин и Яновского затона характеризуются высоким уровнем радионуклидного загрязнения всех компонентов. Тем не менее, здесь продолжают процессы снижения удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде и в тканях гидробионтов, включая исследуемые виды моллюсков. Так, в 2007, 2008 гг. содержание ^{90}Sr у прудовика обыкновенного Яновского затона снизилось по сравнению с концом 1990-х гг. с 10 350 до 6600 Бк/кг, а ^{137}Cs — с 510 до 200 Бк/кг. Более высокими темпами снижения удельной активности радионуклидов характеризовались моллюски оз. Азбучин, у которых за последние 10 лет содержание ^{90}Sr снизилось с 55 500 до 23 000 Бк/кг, а ^{137}Cs — с 2570 до 590 Бк/кг.



5. Динамика удельной активности радионуклидов у живородки в р. Припяти (у г. Чернобыля).

Более сложная ситуация сформировалась в озерах левобережья р. Припяти, расположенных на территории одамбированного участка Красненской поймы. Здесь, при продолжающемся снижении удельной активности ^{137}Cs в тканях моллюсков, более чем в 3—4 раза по сравнению с концом 1990-х гг. возросла удельная активность ^{90}Sr . При этом содержание ^{90}Sr у прудовика обыкновенного увеличилось с 2000 до 9000 Бк/кг, а у катушки роговидной — с 3500 до 10 000 Бк/кг (рис. 6).

Предполагается, что описанная динамика ^{90}Sr у моллюсков озер левобережной поймы связана в первую очередь с изменением физико-химических форм радионуклида в почвах водосборных территорий. Поскольку левобережная пойма оказалась одним из наиболее загрязненных радионуклидами массивов зоны отчуждения, здесь в период 1992—1993 гг. был построен комплекс противопаводковых дамб, изменивших гидрологический режим пойменных потоков в периоды половодий и препятствующих вымыванию радиоактивных веществ из почв загрязненных территорий. Однако это явилось причиной усиления процессов переувлажнения и заболачивания одамбированных территорий. В результате, на фоне общей тенденции увеличения содержания мобильных форм ^{90}Sr в почвах водосборных территорий и донных отложениях водоемов зоны отчуждения [10], в заболоченных грунтах левобережной поймы происходит возрастание концентрации фульво- и гуминовых кислот, снижающее рН водной среды, усиливающее распад горячих частиц, десорбцию радионуклидов и их переход в растворенное состояние, в первую очередь ^{90}Sr , который образует с фульвокислотами рас-

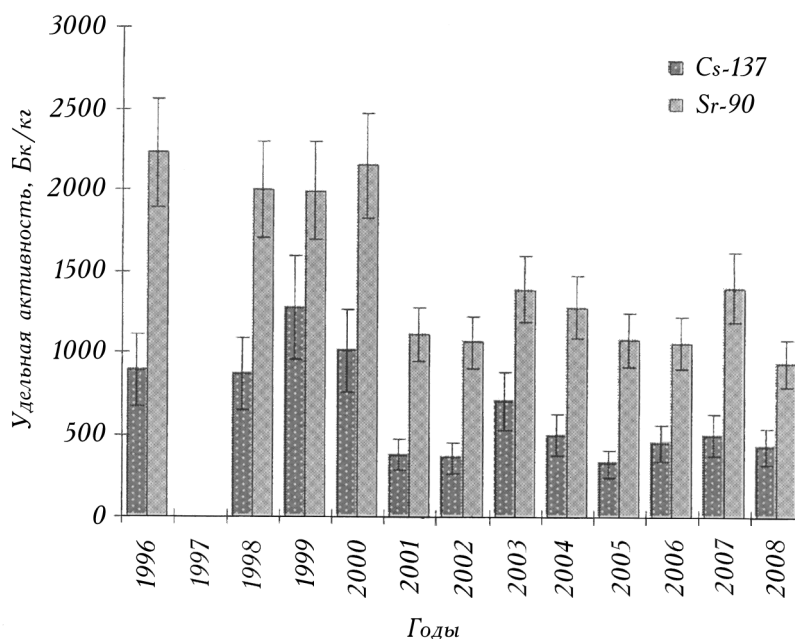


6. Динамика удельной активности радионуклидов у прудовика обыкновенного (а) и катушки роговидной (б) в оз. Глубоком.

творимые комплексы. При этом наблюдается увеличение концентрации мобильных форм радионуклида и их включение в биотический круговорот водных экосистем. Это подтверждает и отмеченное увеличение удельной активности ^{90}Sr в воде озера левобережной поймы в период 2003—2006 гг. на фоне продолжающегося снижения этого показателя для ^{137}Cs , а также регистрируемый нами с 1996 г. рост удельной активности ^{90}Sr в тканях высших водных растений и с 2000 г. — для рыб в озерах Глубоком и Далекое-1 [2—4, 13, 14].

У дрейссены из водоема-охладителя ЧАЭС в период 1996—2000 гг. после относительной стабилизации содержания радионуклидов на уровне 2000 Бк/кг для ^{90}Sr и 1000 Бк/кг для ^{137}Cs начиная с 2001 г. наблюдается ступенчатое снижение удельной активности радионуклидов почти в 2 раза (рис. 7). На наш взгляд, основными, наиболее вероятными причинами такой динамики могут быть снижение удельной радиоактивности воды, а также изменение термического режима водоема-охладителя после остановки последнего действующего блока ЧАЭС в декабре 2000 г. Снижение температуры воды в охладителе, очевидно, является определяющим фактором, поскольку, если среднегодовая удельная активность ^{137}Cs за период 2000—2008 гг. в воде постепенно снизилась почти в 2 раза, причем это снижение наблюдалось и до 2000 г., то удельная активность ^{90}Sr в указанный период с некоторыми колебаниями оставалась практически на одном уровне.

Дозовые нагрузки и радиационные эффекты. Выполненные цитогенетические исследования тканей эмбрионов прудовика обыкновенного свидетельствуют о повышенном уровне аббераций хромосом у беспозвоночных из замкнутых водоемов зоны отчуждения (озера Азбучин, Далекое-1, Глубокомое и Яновский затон) по сравнению с моллюсками условно «чистых» водных объектов (озера Голосеевское, Опечень и Вырлица, расположенные в окр. г. Киева). За период исследований наибольшие значения зарегистрированы для беспозвоночных оз. Глубокого, в клетках которых частота аббераций в

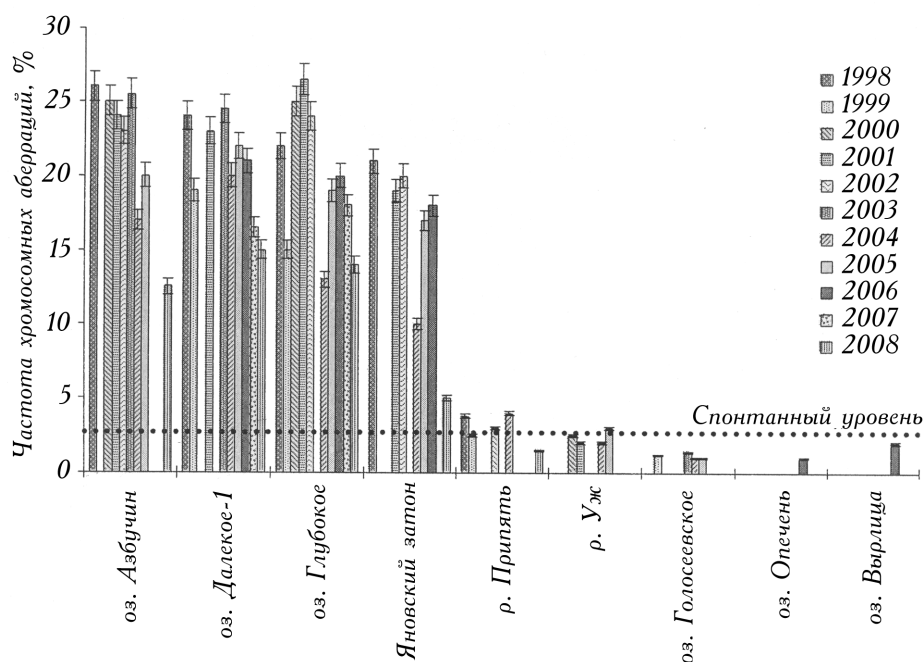


7. Динамика удельной активности радионуклидов у дрейссены водоема-охладителя ЧАЭС.

2001 г. достигала 27%, что более чем в 10 раз превышает уровень спонтанного мутагенеза для водных организмов. Средние значения для моллюсков из наиболее загрязненных озер зоны отчуждения составляли около 23, 21, 20 и 18% — соответственно для озер Азбучин, Далекого 1, Глубокого и Яновского затона. Эмбрионы моллюсков в реках Уж и Припять характеризовались сравнительно невысоким средним уровнем aberrантных клеток, который составлял соответственно 2,5 и 3,5%. Для моллюсков условно «чистых» озер этот показатель равнялся в среднем около 1,5%, с максимальными значениями до 2,3% (рис. 8).

На протяжении 1998—2008 гг. отмечена тенденция снижения частоты хромосомных aberrаций в эмбрионах прудовиков, отобранных в замкнутых водоемах зоны отчуждения. Выполненный регрессионный анализ имеющихся данных позволил получить прогнозные оценки снижения частоты хромосомных aberrаций у моллюсков исследуемых водоемов до спонтанного уровня (2,0—2,5%) [9], присущего водным организмам в условиях естественного радиационного фона. По нашим данным, в озерах, расположенных на территории левобережной поймы р. Припяти (озера Глубокое и Далекое-1), наиболее загрязненной радионуклидами, спонтанный уровень частоты хромосомных aberrаций может быть достигнут в 60—70-х годах, а в Яновском затоне и оз. Азбучин — в 20-х — 30-х годах текущего столетия (рис. 9).

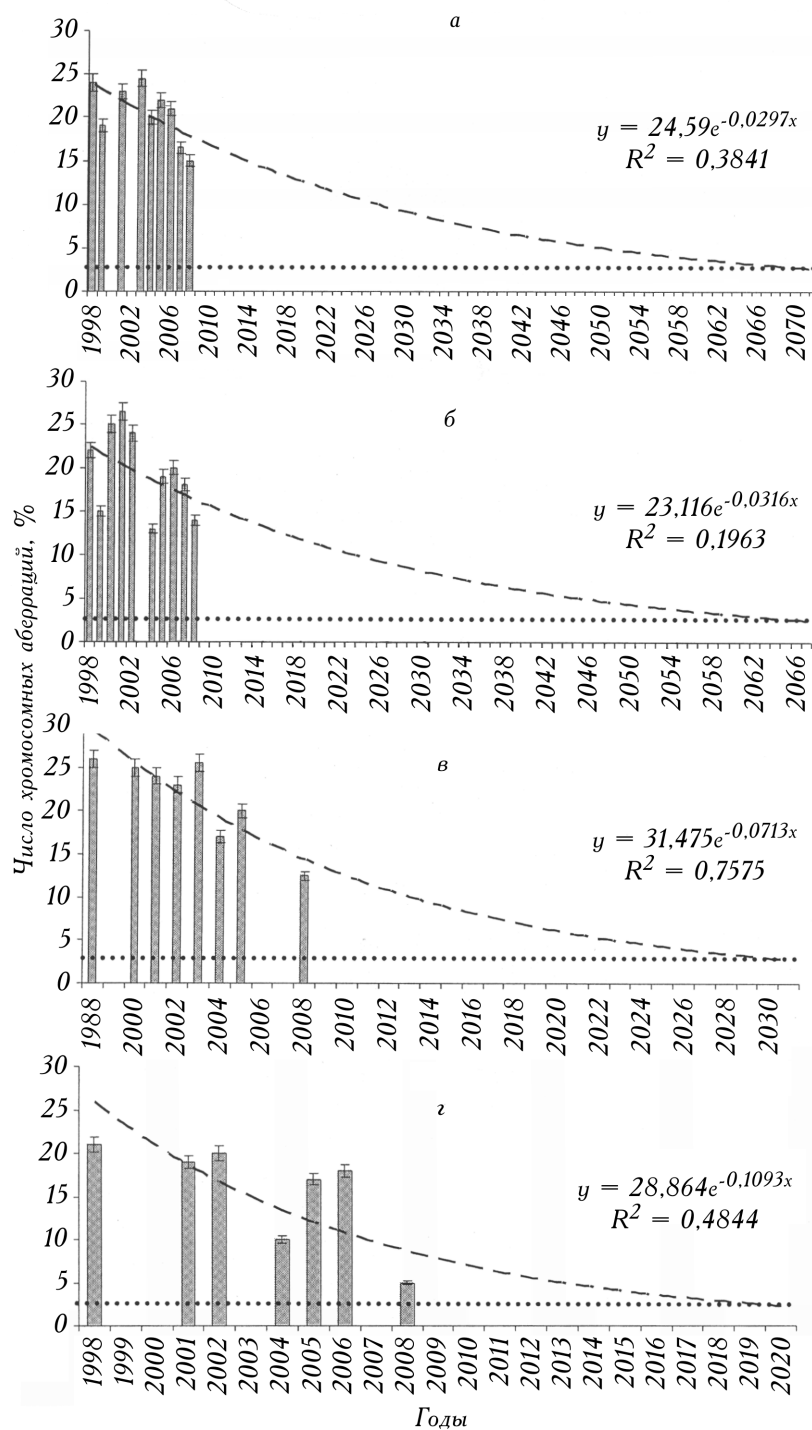
Наиболее высокую достоверность имеет экспоненциальная экстраполяция данных, полученных за 11-летний период для моллюсков оз. Азбучин. Результаты экстраполяции для других замкнутых водоемов имеют невысо-



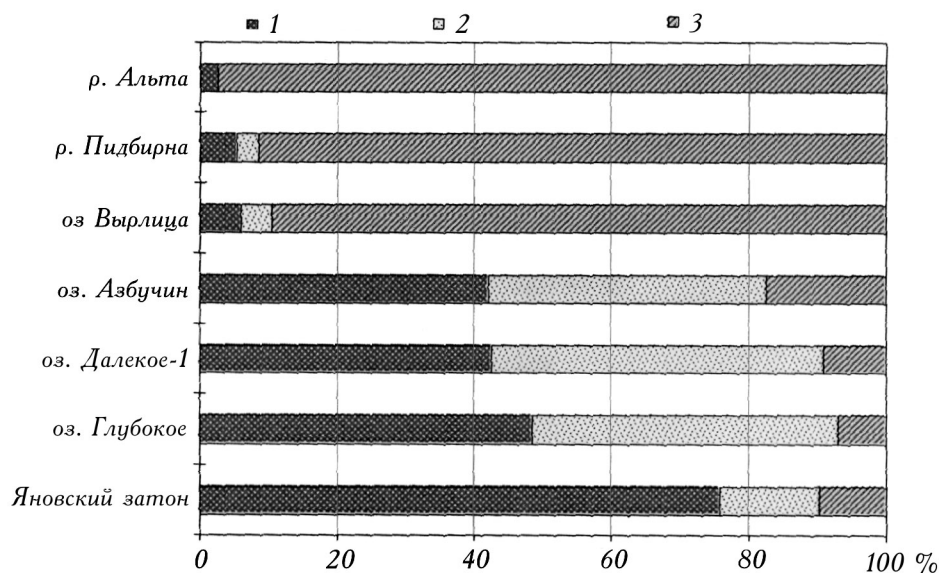
8. Средняя частота хромосомных aberrаций у эмбрионов моллюсков в водоемах зоны отчуждения и озерах г. Киева в период 1998—2008 гг.

кую достоверность аппроксимации, однако заслуживают внимания, поскольку прогноз частоты хромосомных aberrаций для Яновского затона сходен с таковым для оз. Азбучин. Оба эти водоема расположены на правом берегу р. Припяти на расстоянии 2,5 км и характеризуются достаточно сходным гидрологическим и гидрохимическим режимами, поскольку Яновский затон после аварии на ЧАЭС был отсечен от русла реки широкой намывной дамбой и, по сути, превращен в озеро. Поэтому, несмотря на различные уровни загрязнения радионуклидами основных компонентов этих водных экосистем, они имеют сходные тенденции в процессах самоочищения, что может влиять на динамику частоты хромосомных aberrаций у моллюсков. В озерах Глубоком и Далекое-1 более медленные темпы снижения частоты хромосомных aberrаций могут быть обусловлены особенностями динамики удельной активности радионуклидов в компонентах экосистем, описанными выше и свидетельствующими о стагнации автореабилитационных процессов на одамбированной территории левобережной поймы р. Припяти.

Сравнительный анализ состава форменных элементов гемолимфы прудовика обыкновенного показал, что у моллюсков из водоемов зоны отчуждения (озера Глубокое, Далекое 1, Азбучин и Яновский затон) доля мертвых агранулоцитов достигает 43,8%, а количество фагоцитов — 45,0%. Аналогичные показатели у моллюсков из условно «чистых» водоемов (озера Вырлица, Пидбирна и р. Альта) были значительно ниже и составили соответственно в среднем около 5,3 и 4,2%. Количество молодых амебоцитов у моллюсков



9. Прогнозируемое снижение частоты хромосомных aberrаций (пунктирная линия) до спонтанного уровня (точечная линия) у эмбрионов прудовика обыкновенного в замкнутых водоемах ближней зоны отчуждения: а — оз. Далекое 1; б — оз. Глубокое; в — оз. Азбучин; г — Яновский затон.



10. Состав форменных элементов мантийной жидкости прудовика обыкновенного в водоемах зоны отчуждения и в условно «чистых» водоемах в 2007 г.: 1 — мертвые клетки; 2 — фагоцитарные клетки; 3 — молодые клетки.

зоны отчуждения были, наоборот, невысоким — до 20%, в то время как у моллюсков условно «чистых» водоемов достигало 89,6% (рис. 10). В целом, анализ форменных элементов мантийной жидкости исследованных прудовиков свидетельствует о существенном изменении состава гемолимфы моллюсков из наиболее загрязненных озер зоны отчуждения.

Мощность поглощенной дозы для взрослых моллюсков за счет внешних и внутренних источников облучения за период исследований регистрировали в следующих диапазонах: оз. Глубокое — 30—85 мкГр/ч, оз. Азбучин — 18—27, оз. Далекое-1 — 10—17, Яновский затон — 6—12, р. Припять — 0,5—0,7, р. Уж — 0,3—0,5, контрольные водоемы — 0,03—0,04 мкГр/ч. Необходимо отметить, что дозовые нагрузки в приведенных диапазонах моллюски получали с мая по ноябрь при обитании в приповерхностном слое воды литоральной и сублиторальной зон исследуемых водоемов. Таким образом, мы не учитывали дозовую нагрузку, которую моллюски получали в остальной период, находясь на зимовке в донных отложениях водоемов. В связи с этим можно предположить, что среднегодовая мощность поглощенной дозы для прудовика обыкновенного может быть в 2—3 раза выше. В первую очередь это касается замкнутых водоемов зоны отчуждения, характеризующихся высокой плотностью загрязнения радионуклидами донных отложений.

Заключение

Количественные параметры и соотношение удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у пресноводных моллюсков зоны отчуждения определяются в основ-

ном уровнем содержания радионуклидов, а также концентрацией основных катионов — их химических аналогов в воде мест обитания беспозвоночных. Наибольшие значения удельной активности радионуклидов зарегистрированы в замкнутых пойменных водоемах, а наименьшие — в речных экосистемах. В большинстве исследованных водных объектов за период 1997—2008 гг. отмечено продолжающееся снижение удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs у моллюсков. Исключения составляют водоемы, расположенные на территории одамбированного участка Красненской поймы р. Припяти.

Среди исследованных видов наибольшими K_k радионуклидов характеризуются двустворчатые моллюски — перловица обыкновенная и дрейссены. Видоспецифичность накопления ^{90}Sr и трансурановых элементов моллюсками обусловлена преимущественно удельным вкладом раковины в общий вес моллюска. Величина K_k ^{137}Cs в значительной степени зависит от видовых эколого-биологических особенностей, и в частности, от типа питания беспозвоночных. Средние значения K_k исследуемых радионуклидов для представителей брюхоногих и двустворчатых моллюсков зоны отчуждения расположены в ряду убывания следующим образом: прудовик обыкновенный — ^{241}Am (4120) > ^{238}Pu (590) > $^{239+240}\text{Pu}$ (450) > ^{90}Sr (412) > ^{137}Cs (310); дрейссена — ^{241}Am (29250) > ^{238}Pu (9200) > $^{239+240}\text{Pu}$ (8730) > ^{90}Sr (1100) > ^{137}Cs (350).

В оз. Глубоком, расположенном на территории одамбированного участка левобережной поймы р. Припяти, отмечена устойчивая тенденция увеличения содержания ^{90}Sr в тканях моллюсков. Предполагается, что основной причиной такой динамики является строительство комплекса противопаводковых дамб, повлекшее за собой изменение гидрологического режима, а также усиление процессов переувлажнения и заболачивания одамбированных территорий. В результате на фоне общих тенденций увеличения содержания мобильных форм ^{90}Sr в почвах водосборных территорий и донных отложениях водоемов зоны отчуждения происходит повышение удельной активности радионуклида в воде озер, расположенных на одамбированной территории, и интенсивности его концентрирования биотой.

Мощность поглощенной дозы для прудовика обыкновенного при обитании в приповерхностном слое литорали и сублиторали водоемов зоны отчуждения на протяжении 2000—2008 гг. регистрировали в диапазоне 0,3—85,0 мкГр/ч. Максимальные уровни отмечены для озер одамбированного участка левобережной поймы р. Припяти — Глубокого и Далекого-1, минимальные — для проточных водных объектов — рек Уж и Припять. Основным дозообразующим радионуклидом для пресноводных моллюсков зоны отчуждения является ^{90}Sr , на долю которого приходится до 95—98% внутренней дозы облучения.

Цитогенетические и гематологические исследования прудовика обыкновенного в зоне отчуждения свидетельствуют о высоком уровне аберраций хромосом в эмбриональных тканях, а также о существенном изменении состава гемолимфы взрослых особей моллюсков в наиболее загрязненных радионуклидами водных объектах. Частота аберраций хромосом в тканях моллюсков, обитающих в замкнутых водоемах зоны отчуждения, многократно

превышает уровень спонтанного мутагенеза для водных организмов и может быть проявлением радиационно-индуцируемой генетической нестабильности.

Прудовик обыкновенный является широко распространенным видом в водоемах различных типов, а также достаточно радиочувствительным и удобным объектом при выполнении цитогенетического и гематологического мониторинга водных экосистем, испытывающих влияние предприятий ядерного топливного цикла. Этот вид может быть использован в качестве одного из представительных (референтных) видов гидробионтов при разработке положений охраны окружающей среды от ионизирующего излучения с использованием основанного на биоте стандарта.

**

*Проаналізовано видоспецифічність і динаміку накопичення ^{90}Sr , ^{137}Cs , а також трансуранових елементів у двостулкових і червоногих прісноводних молюсків зони відчуження Чорнобильської АЕС в період 1995—2008 рр. Наведено результати оцінки дозових навантажень, частоти хромосомних аберацій і аналізу складу гемолімфи у ставковика звичайного (*Lymnaea stagnalis*). Потужність поглиненої дози реєстрували в діапазоні 0,3—85,0 мкГр/год. У замкнених водоймах відмічено підвищену частоту хромосомних аберацій в тканинах ембріонів (до 27%), а також зміну гематологічних показників у дорослих особин молюсків.*

**

*Species-specificity and dynamics of ^{90}Sr , ^{137}Cs and transuranic elements accumulation in bivalve and gastropod freshwater molluscs of the Chernobyl exclusion zone during 1995—2008 was analyzed. The results of radiation dose and chromosome aberration rate estimation and analysis of hemolymph composition of freshwater snail (*Lymnaea stagnalis*) was produced. The absorbed dose rate was registered in the range of 0,3—85,0 $\mu\text{Gy h}^{-1}$. In closed water bodies the heightened chromosome aberration rate (up to 27%) in embryo tissues, and also change of haematological indexes for the adult individuals of snails was registered.*

**

1. Гудков Д.И., Деревец В.В., Кузьменко М.И., Назаров А.Б. Функционально-экологические и возрастные закономерности концентрирования радионуклидов пресноводными моллюсками зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. — 2001. — Т. 41, № 3. — С. 326—330.
2. Гудков Д.И., Каглян А.Е., Киреев С.И. и др. Основные дозообразующие радионуклиды в рыбе зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Там же. — 2008. — Т. 48, № 1. — С. 48—58.
3. Гудков Д.И., Киреев С.И., Обрізан С.М. та ін. Радіоекологічні проблеми перезволоження та заболочування одамбованої території Красненської заплави в зоні відчуження // Бюл. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. — 2005. — № 2. — С. 3—7.
4. Гудков Д.И., Кузьменко М.И., Киреев С.И., Назаров А.Б. Радиоекологические последствия аварии на Чернобыльской АЭС для водных экосистем зоны отчуждения // Радиоекологические исследования в зоне отчужде-

- ния Чернобыльской АЭС (к 20-летию аварии на Чернобыльской АЭС). Тр. Коми научного центра УрО РАН, № 180. — Сыктывкар, 2006. — С. 201—223.
5. Дзюбо С.М., Романова Л.Г. Морфология амебоцитов гемолимфы приморского гребешка // Цитология. — 1992. — Т. 34, № 10. — С. 52—58.
 6. Иванов Ю.О. Динамика перераспределения радионуклидов в грунтах и растительности // Чернобыль — Зона отчуждения / Под ред. В. Г. Барьяхтара. — Киев: Наук. думка, 2001. — С. 47—76.
 7. Кашпаров В.О. Загрязнение ⁹⁰Sr территории зоны отчуждения // Бюллетень экологического состояния зоны отчуждения и зоны безусловного (обязательного) отселения. — 1998. — № 12. — С. 41—43.
 8. Паушева З.П. Практикум по цитологии растений. — М.: Колос, 1974. — 288 с.
 9. Поликарпов Г.Г., Цыцугина В.Г. Закономерности распределения аберраций хромосом по клеткам гидробионтов при действии ионизирующего излучения и химических мутагенов // Радиобиология. — 1993. — Т. 33, № 2. — С. 205—213.
 10. Соботович Э.В., Бондаренко Г.Н., Кононенко Л.В. и др. Геохимия техногенных радионуклидов. — Киев: Наук. думка, 2002. — 332 с.
 11. *Handbook* for assessment of the exposure of biota to ionising radiation from radionuclides in the environment / Eds. J. Brown, P. Strand, A. Hosseini, P. Børretzen. — Project within the EC 5th Framework Programme, Contract № FIGE-CT-2000-00102. — Stockholm, Framework for Assessment of Environmental Impact, 2003. — 395 p.
 12. Majone F., Brunetti R., Gola I., Levis A.G. Persistence of micronuclei in the marine mussel, *Mytilus galloprovincialis*, after treatment with mitomycin // *Mutat. Res.*, 1987. — Vol. 191, N 3—4. — P. 157—161.
 13. Gudkov D.I., Kuzmenko M.I., Kireev S.I. et al. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone // 20 Years after the Chernobyl Accident: Past, Present and Future / Ed. by E. B. Burlakova, V. I. Naidich. — New York: Nova Science Publishers, Inc., 2006. — P. 265—285.
 14. Gudkov D.I., Nazarov A.B., Kaglyan A.E. Change of radionuclide bioavailability in conditions of swamping territories within the Chernobyl accident Exclusion Zone // Proc. of Oral and Oral Poster Presentations of the International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity, 15—20 June 2008, Bergen, Norway / Ed. by P. Strand, J. Brown, T. Jølle. — Østerås: Norwegian Radiation Protection Authority, 2008. — Part 2. — P. 171—174.

¹ Институт гидробиологии НАН Украины, Киев

² Государственное специализированное научно-производственное предприятие «Чернобыльский радиоэкологический центр» МЧС Украины, Чернобыль

Поступила 03.04.09