

УДК [594.38:575.2](28)(477.41)

¹Д.І. Гудков, д.б.н., с.н.с.²О.В. Дзюбенко, асп.³О.М. Проценко, магістр⁴Л.С. Чепіга, студ.

МОЛЮСКИ В РАДІОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕННЯХ ПРІСНОВОДНИХ ЕКОСИСТЕМ

^{1,2}Інститут гідробіології НАН України^{3,4}Національний авіаційний університет¹E-mail: digudkov@svitonline.com²E-mail: radioeco@i.com.ua³E-mail: mary_mishon@bigmir.net⁴E-mail: LyudmilaCh@i.ua

Проаналізовано видоспецифічність і динаміку концентрування ^{90}Sr , ^{137}Cs та деяких трансуранових елементів у двостулкових і черевоногих прісноводних молюсків Чорнобильської зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення в період 1998–2010 рр. Наведено результати оцінки дозових навантажень, частоти хромосомних аберацій та аналізу складу гемолімфи молюсків. Потужність поглиненої дози опромінення реєстровано в діапазоні 0,3–85,0 мкГр/год. У замкнутих водоймах відмічено підвищену частоту хромосомних аберацій у тканинах ембріонів (до 27 %) та зміну гематологічних показників у дорослих особин молюсків.

Ключові слова: гематологічні показники, дозові навантаження, прісноводні молюски, радіонуклідне забруднення, хромосомні аберації, Чорнобильська зона відчуження.

Постановка проблеми

Водні молюски є широко використовуваними об'єктами радіоекологічних і радіобіологічних досліджень акваторій, що зазнають впливу підприємств ядерного паливного циклу.

Завдяки здатності накопичувати майже всі радіонукліди, що присутні в оточуючому їх середовищі, та високій біомасі молюски відіграють важливу роль у процесах акумуляції та біоседиментації радіоактивних речовин у прісноводних екосистемах.

Це дозволяє розглядати цих безхребетних, з одного боку, як види-індикатори забруднення навколишнього середовища радіонуклідами, а з іншого – як організми, що беруть активну участь у процесах перерозподілу радіоактивних речовин у гідробіоценозах.

Водні екосистеми атомної електростанції Чорнобильській зони відчуження і через 25 років характеризуються високими рівнями

радіонуклідного забруднення зі складною динамікою фізико-хімічних форм, що впливають на швидкість міграції, біологічну доступність та інтенсивність накопичення радіонуклідів компонентами екосистем [1–6].

Збільшення концентрування радіоактивних речовин біотою може зумовлювати критичні дозові навантаження на організми, яким притаманні високі коефіцієнти накопичення радіонуклідів і які населяють екологічні зони з підвищеними рівнями зовнішнього опромінювання.

Однією з найважливіших радіоекологічних проблем, пов'язаних із наслідками аварії на ЧАЕС, залишається оцінка ушкоджень біосистем у результаті інтенсивного радіонуклідного забруднення і зумовленого цим радіаційного опромінювання, яке в зоні відчуження набуло хронічного характеру.

Метою роботи є:

– аналіз видоспецифічності і динаміки концентрування ^{90}Sr , ^{137}Cs прісноводними молюсками;

– оцінка дозових навантажень за рахунок зовнішніх джерел опромінювання і радіонуклідів, інкорпорованих у тканинах;

– аналіз частоти хромосомних аберацій у період ембріонального розвитку, складу гемолімфи дорослих особин молюсків у водоймах зони відчуження.

Об'єкти і методи досліджень

Основні дослідження виконували в період 1998–2010 рр. в оз. Азбучин, Янівському (Прип'ятському) затоні, водоймі-охолоджувачі (ВО) ЧАЕС, озерах Красненської заплави р. Прип'яті – Глибоке і Далеке-1, р. Уж (біля с. Черевач) і р. Прип'ять (біля Чорнобиля).

Як контрольні водойми для порівняльних цитогенетичних і гематологічних досліджень використовували озера з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення, розташованих в Києві та його околицях – Вирлиця, Голосіївське, Опечінь, Підбірна.

Аналіз вмісту радіонуклідів у молюсках проводили з використанням таких видів:

ставковик звичайний (*Lymnaea stagnalis* L.);

ставковик болотний (*Stagnicola palustris* L.);

ставковик яйцеподібний (*Radix ovata* L.);

котушка рогова (*Planorbis corneus* L.);

живородка річкова (*Viviparus viviparus* L.);

дрейсена (*Dreissena polymorpha* Pall. і

D. bugensis Andr.);

перлівниця звичайна (*Unio pictorum* L.);

перлівниця клиноподібна (*Unio tumidus* Phil.);

жабурниця звичайна (*Anodonta cygnea* L.).

Вимірювання питомої активності радіонуклідів у молюсках виконували без відділення м'яких тканин від черепашки.

Результати вимірювань наведено в бекерелях на кілограм (Бк/кг) маси при природній вологості.

Здатність молюсків акумулювати радіонукліди визначали як коефіцієнт концентрування K_k , розраховували відношенням питомої активності радіонуклідів у молюсках до середньорічної питомої активності води місць проживання і виражали в літрах на кілограм (л/кг).

Видоспецифічність і рівні накопичення радіонуклідів

Серед полігонних водойм зони відчуження найбільші середні показники питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs протягом періоду досліджень реєстрували в молюсках оз. Глибоке. Далі за зменшенням вмісту радіонуклідів знаходилися молюски оз. Азбучин, оз. Далеке-1, Янівського затону і ВО ЧАЕС.

Вміст ^{137}Cs в молюсках Янівського затону, не зважаючи на порівняно високі значення питомої активності ^{90}Sr , був істотно менший порівняно з молюсками ВО ЧАЕС.

Найнижчим вмістом радіонуклідів характеризувалися молюски з проточних водних об'єктів – р. Уж і р. Прип'ять (рис. 1).

Кількісні параметри питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у прісноводних молюсках зони відчуження досить добре відбивають рівні

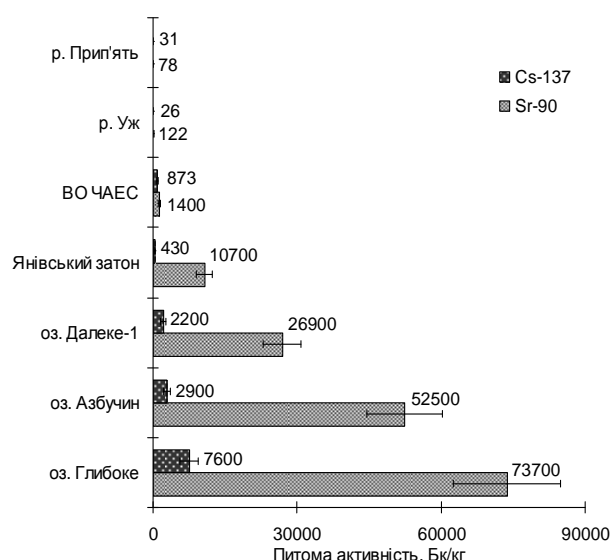


Рис. 1. Середні значення питомої активності радіонуклідів у прісноводних молюсках зони відчуження в період 1998–2009 рр.

вмісту радіонуклідів в основних компонентах досліджуваних водних екосистем і, в першу чергу, у воді місць проживання безхребетних.

У результаті аналізу співвідношення питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs в молюсках і у воді досліджуваних водойм та зіставлення цих показників із катіонним складом води відмічено найменше відношення питомої активності ^{137}Cs до ^{90}Sr в молюсках ВО ЧАЕС порівняно з рештою полігонних водойм. Це можна пояснити аномально високим серед водойм зони відчуження відношенням питомої активності ^{90}Sr до ^{137}Cs у воді ВО ЧАЕС, що відбивається на інтенсивності накопичення радіонуклідів молюсками. Але основною причиною підвищеного вмісту ^{137}Cs в тканинах молюсків ВО порівняно з молюсками Янівського затону, вміст ^{90}Sr в яких у вісім разів вищий, є низький вміст у воді ВО катіонів Na^+ та K^+ , що визначає високе співвідношення $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$ і створює сприятливі умови для акумуляції ^{137}Cs .

Вплив катіонного складу води на співвідношення питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у молюсків також добре спостерігається і на прикладі водойм лівобережжя (оз. Глибоке і оз. Далеке-1) і правобережжя р. Прип'яті (оз. Азбучин і Янівський затон), що характеризуються різним гідрохімічним і гідрологічним режимами.

Не зважаючи на порівняно високе відношення $^{90}\text{Sr} / ^{137}\text{Cs}$ у воді озер лівобережної заплави, співвідношення цих радіонуклідів у молюсках нижче, ніж у водоймах правобережжя.

Головною причиною такого співвідношення радіонуклідів є низьке відношення $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+ + \text{K}^+$ у воді Янівського затону і оз. Азбучин, що визначає невисоку інтенсивність концентрування ^{137}Cs молюсками.

На прикладі ставковика звичайного, як найбільш поширеного і доступного для відбору виду в досліджуваних водоймах,

розглянуто особливості концентрування ^{90}Sr та ^{137}Cs .

Аналіз розрахунків показав, що середні значення K_k ^{90}Sr знаходилися в діапазоні 360–550 л/кг, що визначає різницю між максимальними і мінімальними значеннями в 1,5 рази і дозволяє робити висновок про неістотну відмінність K_k ^{90}Sr у ставковика звичайного у водоймах зони відчуження (рис. 2, а).

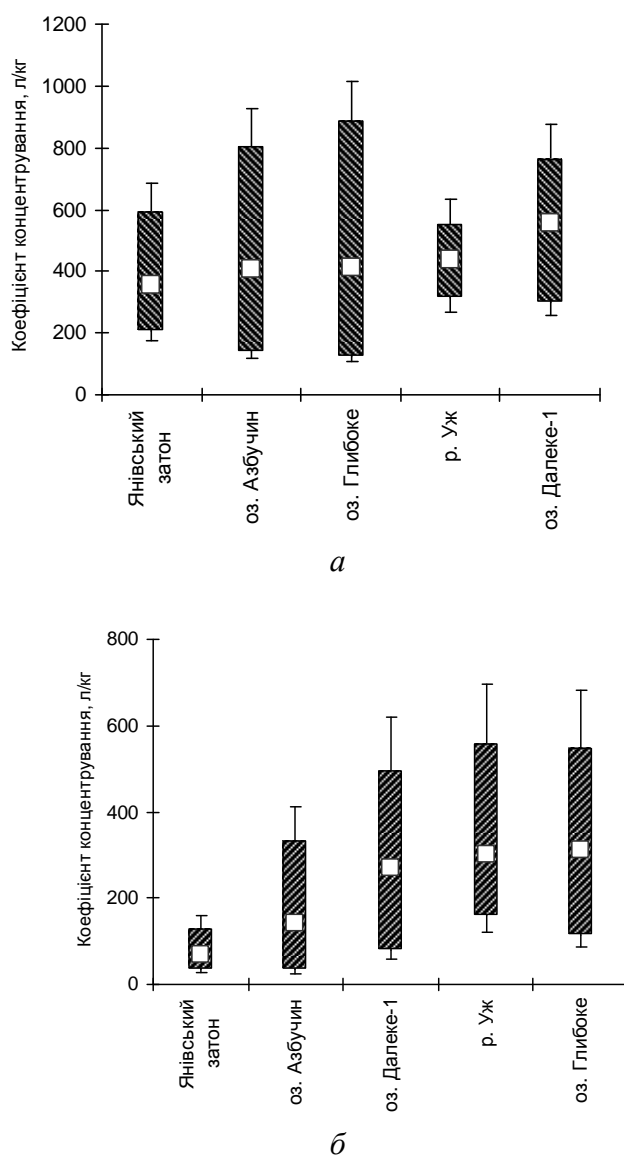


Рис. 2. Діапазон значення K_k ^{90}Sr ставковика звичайного у водоймах зони відчуження: а – середні значення K_k ^{90}Sr ; б – середні значення K_k ^{137}Cs

Значення середніх величин K_K для ^{137}Cs було в межах 70–300 л/кг, що визначало різницю між максимальними і мінімальними значеннями більш ніж у чотири рази (рис. 2, б).

Мінімальні середні значення відмічено в Янівському затоні і оз. Азбучин, катіонний склад води в яких відрізняється порівняно високим вмістом катіонів Na^+ та K^+ , що визначає низьку інтенсивність концентрування молюсками ^{137}Cs .

Мінімальні значення ^{238}Pu та $^{239+240}\text{Pu}$ в тканинах молюсків відмічені для ставковика звичайного відповідно 0,1 і 0,2 Бк/кг в оз. Далеке-1 та 2,7 і 6,4 Бк/кг в оз. Глибоке.

Дещо вищий вміст відмічений для ставковика болотного з оз. Глибоке – відповідно 14,0 і 36,0 Бк/кг.

Максимальні активності серед червоногих молюсків водойм Красненської заплави зареєстровані для катушки рогової відповідно 0,9 і 2,1 Бк/кг в оз. Далеке-1 та 24,7 і 53,0 Бк/кг в оз. Глибоке.

Дрейсена з ВО ЧАЕС характеризувалася величинами питомої активності ^{238}Pu та $^{239+240}\text{Pu}$ відповідно 2,8 і 6,2 Бк/кг.

Вміст ^{241}Am був мінімальним у тканинах ставковика звичайного і реєструвався в діапазоні 5–30 (15) Бк/кг в оз. Далеке-1 та 6–51 (27) Бк/кг в оз. Глибоке.

Для ставковика болотного з оз. Глибоке відмічені концентрації до 75 Бк/кг.

Максимальні значення зареєстровані для катушки рогової – 18–29 (24) Бк/кг в оз. Далеке-1 та 80–310 (170) Бк/кг в оз. Глибоке.

Вміст ^{241}Am в тканинах дрейсени з ВО ЧАЕС становив близько 8 Бк/кг.

Аналіз видоспецифічності накопичення ^{90}Sr і ^{137}Cs показав, що двостулкові молюски, які є облігатними фільтраторами та мають масивну черепашку, є більш ефективнішими концентраторами радіонуклідів порівняно з червоногими молюсками.

Так, майже в усіх досліджуваних водоймах найбільші K_K радіонуклідів відмічені в перлівниці звичайної.

Відмінності в накопиченні ^{90}Sr , що концентрується переважно в скелетних утвореннях, зумовлені в першу чергу питомим внеском черепашок у загальну вагу молюска.

Найбільші значення K_K ^{90}Sr відмічені в перлівниці звичайної і дрейсени.

Концентрування ^{137}Cs із більшою ефективністю відбувається у двостулкових молюсків, а у різних видів червоногих майже на одному рівні.

Особливості морфологічної будови і функціонування червоногих і двостулкових молюсків зумовлюють певні відмінності щодо будови тіла та співвідношення специфічних тканин і органів, які концентрують радіонукліди. Це визначає різні величини K_K досліджуваних радіонуклідів для представників різних груп і дозволяє на прикладі ставковика звичайного з оз. Глибоке і дрейсени з ВО ЧАЕС розташувати середні значення K_K у ряді зменшення таким чином:

– ставковик звичайний:
 ^{241}Am (4120) > ^{238}Pu (590) > $^{239+240}\text{Pu}$ (450) > ^{90}Sr (412) > ^{137}Cs (310);

– дрейсена:
 ^{241}Am (29250) > ^{238}Pu (9200) > $^{239+240}\text{Pu}$ (8730) > ^{90}Sr (1100) > ^{137}Cs (350).

Дозові навантаження і радіаційні ефекти

Потужність поглиненої дози для дорослих червоногих молюсків за рахунок зовнішніх і внутрішніх джерел опромінювання за період досліджень реєстрували в таких діапазонах:

оз. Глибоке – 30–85 мкГр/год;
 оз. Азбучин – 18–27 мкГр/год;
 оз. Далеке-1 – 12–20 мкГр/год;
 Янівський затон – 6–12 мкГр/год;
 р. Прип'ять – 0,5–0,7 мкГр/год;
 р. Уж – 0,3–0,5 мкГр/год;
 контрольні водойми – 0,03–0,04 мкГр/год.

Середні значення потужності дози внутрішнього опромінювання молюсків зони відчуження, які зумовлені інкорпорацією в тканинах радіонуклідів ^{90}Sr , ^{137}Cs і трансуранових елементів (ТУЕ), реєстрували від 0,05 мкГр/год в р. Прип'яті до 46,0 мкГр/год в оз. Глибоке.

Основним дозоутворюючим радіонуклідом в усіх досліджуваних водоймах є ^{90}Sr .

У замкнутих водоймах зони відчуження за рахунок цього радіонукліда формується 96–98 % дози внутрішнього опромінювання молюсків. Внесок ^{137}Cs тут становить 1–3 %, а ТУЕ – до 1 %.

У водоймах-охолоджувачах ЧАЕС і річках зони відчуження внесок ^{90}Sr в дозу внутрішнього опромінювання дещо менший – 80–90 %, а частка ^{137}Cs і ТУЕ становить відповідно 7–15 і 5–6 %. Таке співвідношення зумовлене в першу чергу порівняно високим вмістом ^{137}Cs щодо ^{90}Sr у воді, а також її катіонним складом, що визначає нижчу інтенсивність концентрування ^{90}Sr .

Виконані цитогенетичні дослідження в тканинах ембріонів ставковика звичайного свідчать про підвищений рівень аберацій хромосом у безхребетних замкнутих водоймах зони відчуження (оз. Азбучин, оз. Далеке-1, оз. Глибоке та Янівський затон) порівняно з

молюсками озер Києва (Голосіївське, Опечінь, Вирлиця) з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення.

За період досліджень найбільші значення зареєстровані для безхребетних оз. Глибоке, в клітинах яких частота аберацій в 2001 р. досягала 27 %, що більш ніж у 10 разів перевищує рівень спонтанного мутагенезу для водних організмів.

Середні значення для молюсків із найбільш забруднених озер зони відчуження становили близько 23, 21, 20, 18 % відповідно для оз. Азбучин, оз. Далеке-1, оз. Глибоке та Янівського затону.

Ембріони молюсків в р. Уж і р. Прип'ять характеризувалися невисоким середнім рівнем абераційних клітин – відповідно 2,5 і 3,5 %.

Для молюсків контрольних озер цей показник дорівнював у середньому близько 1,5 %, з максимальними значеннями до 2,3 % (рис. 3).

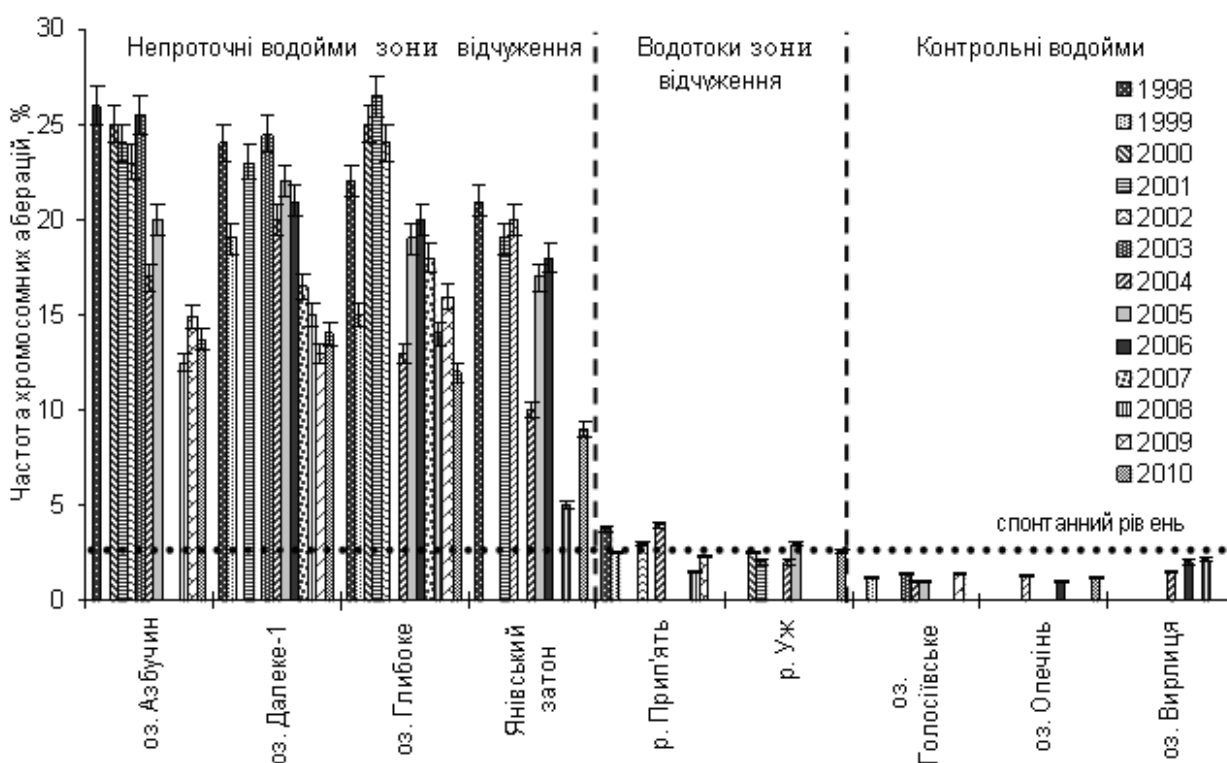


Рис. 3. Середня частота хромосомних аберацій у ембріонів ставковика звичайного у водоймах зони відчуження і озерах Києва протягом 1998–2010 рр.

Упродовж 1998–2010 рр. відмічена тенденція зниження частоти хромосомних аберацій в ембріонах ставковиків, відібраних у замкнутих водоймах зони відчуження.

Аналіз наявних даних дозволив отримати прогнозні оцінки зниження частоти хромосомних аберацій у молюсків досліджуваних водойм до спонтанного рівня (2,0–2,5 %) [7], який притаманний водним організмам в умовах природного радіаційного фону.

В озерах, що розташовані на території лівобережної заплави р. Прип'яті (оз. Глибоке і оз. Далеке-1), найбільш забрудненої радіонуклідами, спонтанний рівень частоти хромосомних аберацій може бути досягнутий у 60–70-х рр., а в Янівському затоні і оз. Азбучин – у 20–30-х рр. XXI ст. [8].

Відмічена позитивна кореляція між частотою хромосомних аберацій і потужністю поглиненої дози опромінення в ембріонів ставковика звичайного у водоймах зони відчуження.

Дозова залежність кількості абераційних клітин в ембріональних тканинах молюсків найбільш відповідає ступеневій функції (рис. 4).

Порівняльний аналіз складу формених елементів гемолімфи ставковика звичайного показав, що в молюсків із водойм зони відчуження

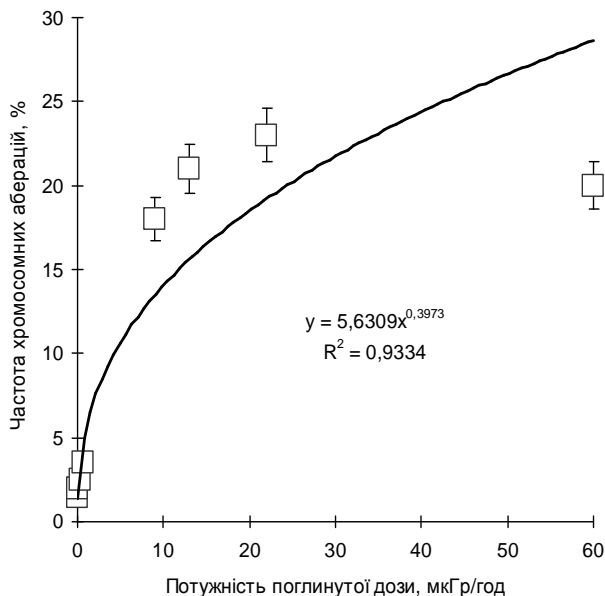


Рис. 4. Залежність кількості абераційних клітин в ембріональних тканинах ставковика звичайного від потужності поглинутої дози опромінення

(оз. Глибоке, оз. Далеке-1, оз. Азбучин і Янівський затон) частка мертвих агранулоцитів становить 43,8 %, а кількість фагоцитів – 45,0 % (рис. 5).

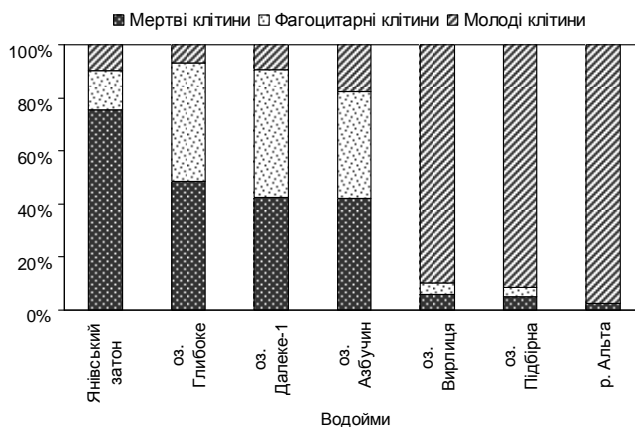


Рис. 5. Склад формених елементів мантийної рідини ставковика звичайного у водоймах у 2007–2008 рр.

Аналогічні показники у молюсків водних об'єктів із фоновим рівнем радіонуклідного забруднення (оз. Вирлиця, оз. Підбірна і р. Альта) були значно нижчі і становлять відповідно в середньому близько 5,3 і 4,2 %.

Кількість молодих амебоцитів у молюсків зони відчуження була навпаки невисокою – до 20 %, тоді як у молюсків із контрольних водойм досягала 89,6 %. Загалом, аналіз формених елементів мантийної рідини досліджених ставковиків, свідчить про істотну зміну складу гемолімфи молюсків із найбільш забруднених озер Зони відчуження.

Висновки

Кількісні параметри та співвідношення питомої активності ^{90}Sr та ^{137}Cs у прісноводних молюсків зони відчуження визначаються переважно рівнем вмісту радіонуклідів, а також концентрацією основних катіонів – їх хімічних аналогів у воді місць проживання безхребетних. Найбільші значення питомої активності радіонуклідів зареєстровані в замкнутих заплавах водоймах, а найменші – в річкових екосистемах.

Серед досліджених видів найбільшими K_k радіонуклідів характеризуються двостулкові молюски – перлівниця звичайна і дрейсени.

Видоспецифічність накопичення ^{90}Sr і ТУЕ моллюсками зумовлена переважно питомим внеском черепашки в загальну вагу моллюска.

Величина K_k ^{137}Cs значною мірою залежить від видових еколого-біологічних особливостей і, зокрема, від типу живлення безхребетних.

Середні значення K_k досліджуваних радіонуклідів для представників червононогих і двостулкових моллюсків зони відчуження розташовані в ряді зменшення.

Потужність поглиненої дози опромінювання для червононогих моллюсків при проживанні в приповерхневому шарі літоралі і субліторалі водойм зони відчуження впродовж 2000–2010 рр. реєстрували в діапазоні 0,3–85,0 мкГр/ч. Максимальні рівні відмічені для озер одамбованої ділянки лівобережної заплави р. Прип'яті – оз. Глибоке і оз. Далеке-1, мінімальні – для проточних водних об'єктів – р. Уж і р. Прип'яті.

Основним дозоутворюючим радіонуклідом для прісноводних моллюсків зони відчуження є ^{90}Sr , на долю якого припадає до 95–98 % внутрішньої дози опромінювання.

Цитогенетичні і гематологічні дослідження ставковика звичайного в зоні відчуження свідчать про високий рівень аберацій хромосом в ембріональних тканинах, а також про істотні зміни складу гемолімфи дорослих особин моллюсків у найбільш забруднених радіонуклідами водних об'єктах. Частота аберації хромосом у тканинах моллюсків, що мешкають у замкнутих водоймах зони відчуження, набагато разів перевищує рівень спонтанного мутагенезу для водних організмів і може бути проявом радіаційно-індукованої генетичної нестабільності.

Сташковик звичайний є широко розповсюдженим видом у водоймах різних типів, а також достатньо радіочутливим і зручним об'єктом при виконанні цитогенетичного і гематологічного моніторингу водних екосистем, що зазнають впливу підприємств ядерного паливного циклу. Цей вид може бути використаний як один із представницьких (референтних) видів гідробіонтів при розробці положень охорони

навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання з використанням заснованого на біоті стандарту.

Література

1. *Функционально-экологические и возрастные закономерности концентрирования радионуклидов пресноводными моллюсками зоны отчуждения Чернобыльской АЭС* / Д.И. Гудков, В.В. Деревец, М.И. Кузьменко, А.Б. Назаров // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2001. – Т. 41, № 3. – С. 326–330.
2. *Радиоэкологічні проблеми перезволоження та заболочування одамбованої території Красненської заплави в зоні відчуження* / Д.І. Гудков, С.І. Кіреєв, С.М. Обрізан та ін. // Бюл. екологічного стану зони відчуження та зони безумовного (обов'язкового) відселення. – 2005. – № 2. – С. 3–7.
3. *Іванов Ю.О.* Динамика перераспределения радионуклидов в грунтах и растительности / Ю.О. Иванов // Чернобыль – зона отчуждения / под ред. В.Г. Барьяхтара. – К.: Наукова думка, 2001. – С. 47–76.
4. *Кашпаров В.О.* Загрязнение ^{90}Sr территории зоны отчуждения / В.О. Кашпаров // Бюл. экологического состояния зоны отчуждения и зоны безусловного (обязательного) отселения. – 1998. – № 12. – С. 41–43.
5. *Геохимия техногенных радионуклидов* / Э.В. Собонович, Г.Н. Бондаренко, Л.В. Кононенко и др.. – К.: Наукова думка, 2002. – 332 с.
6. *Gudkov, D.I.; Kuzmenko, M.I.; Kireev, S.I. et al.* 2006. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone / 20 Years after the Chernobyl Accident: Past, Present and Future. – E.V. Burlakova, V.I. Naidich (Eds.). New York: Nova Science Publishers. Inc: P. 265–285.
7. *Tsytsugina, V.G.* 1998. An indicator of radiation effects in natural populations of aquatic organisms. – Radiat. Protect. Dosim. 75 (1–4): P. 171–173.
8. *Радиоэкологические исследования пресноводных моллюсков в Чернобыльской зоне отчуждения* / Д.И. Гудков, А.Б. Назаров, Е.В. Дзюбенко та ін. // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2009. – Т. 49, № 6 – С. 703–713.