

Н. А. Поморцева^{1,*}, Д. І. Гудков¹, Н. К. Родіонова², О. Є. Каглян¹¹ Інститут гідробіології НАН України, Київ, Україна² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*Відповідальний автор: natapomorceva@gmail.comНАСЛІДКИ ТРИВАЛОГО ВПЛИВУ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
НА КРОВОТВОРНУ СИСТЕМУ РИБ У ВОДОЙМАХ
ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Проаналізовано гематологічні показники краснопірки *Scardinius erythrophthalmus*, плітки звичайної *Rutilus rutilus*, окуня *Perca fluviatilis* та карася сріблястого *Carassius gibelio* з найбільш забруднених радіонуклідами водойм Чорнобильської зони відчуження. Наведено дані щодо змін абсолютної кількості та відносного складу лейкоцитів, а також морфологічних порушень еритроцитів у периферичній крові риб у градієнті потужності поглиненої дози 5,1 - 84,5 мкГр/год. У контрольних водоймах дози опромінення не перевищували 0,07 мкГр/год. За потужності поглиненої дози до 30 - 40 мкГр/год у крові риб зареєстровано здебільшого реакційні зміни компенсаторного характеру з підвищенням вмісту лейкоцитів за рахунок лімфоцитарної і гранулоцитарної фракцій. За дії більш високих доз відмічено погіршення стану кровотворення зі зниженням вмісту лейкоцитів і значними змінами в лейкограмах. Встановлено, що зі збільшенням потужності поглиненої дози зростає кількість морфологічних порушень та патологічних змін еритроцитів.

Ключові слова: Чорнобильська зона відчуження, радіонуклідне забруднення, риби, потужність поглиненої дози, *Scardinius erythrophthalmus*, *Rutilus rutilus*, *Perca fluviatilis*, *Carassius gibelio*, кровотворна система, лейкоцитарна формула, морфологічні порушення еритроцитів.

1. Вступ

Радіонуклідне забруднення водойм внаслідок аварійних ситуацій на підприємствах ядерного паливного циклу може спричиняти ураження водних організмів на різних рівнях організації біологічних систем. Серед найбільш чутливих до дії радіаційного чинника таксономічних груп гідробіонтів є представники іхтіофауни [1 - 5]. Основними складовими, що формують дозу опромінення риб є особливості живлення та проживання у певних екологічних зонах водойм [6 - 9]. Оскільки у донних відкладах більшості непроточних водних об'єктів, що зазнали інтенсивного забруднення радіоактивними речовинами в результаті аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС), міститься понад 90 % усіх радіонуклідів, які надійшли до водойм упродовж гострої фази аварії 1986 р., і продовжували надходити за рахунок вторинних джерел забруднення в подальшому [10, 11], найвищі дози опромінення отримують види, які ведуть придонний спосіб життя [12 - 14].

Упродовж перших місяців після аварії на ЧАЕС риби у найбільш забруднених водоймах зазнали радіаційного впливу, потужність якого була порівняна з напівлетальною дозою, внаслідок чого, невиключно, що найбільш чутливі до дії

іонізуючого випромінювання особини або навіть види могли загинути [15 - 17]. У подальшому в результаті розпаду короткоживучих радіонуклідів дозове навантаження на риб поступово зменшувалось, але набуло хронічного характеру завдяки радіонуклідам з великим періодом напіврозпаду (¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, а також трансуранові елементи), які в даний час формують дозу опромінення, зокрема, водної біоти в межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) [11, 18, 19].

Ланки кровотворної системи риб виявляють високу чутливість, одними з найперших реагуючи на дію радіаційного чинника, а зміни кількісних і якісних показників лейкоцитів периферичної крові дають змогу оцінити роботу механізмів імунної системи та рівень імунологічної реактивності, що забезпечує збереження гомеостазу організму [3, 20, 21]. При цьому, зміни у складі крові риб виникають за дії порівняно невисоких доз іонізуючого випромінювання [3, 22 - 25]. У експериментальних умовах встановлено, що за потужності поглиненої дози (ППД) 20 - 40 мкГр/год із загальної дозою 0,05 - 0,2 Гр існує пороговий рівень для появи перших змін у крові риб і перших ознак погіршення функціонування імунної системи [20, 26]. Що стосується тривалого опромінення у природних умовах, то його радіобіологічна ефективність вважається значно вищою [16, 27 - 29].

© Автор(и), 2025

Стаття опублікована ІЯД НАН України за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC 4.0

Зміни стану кровотворної системи риб в умовах тривалого радіонуклідного забруднення природних водойм залишаються недостатньо вивченими. Тому дослідження дозозалежних гематологічних ефектів у риб ЧЗВ, і з'ясування реакції кровотворної системи на хронічне опромінення є вкрай необхідним для розуміння механізмів регуляції захисних функцій організму риб, його адаптаційних можливостей, а також є важливою складовою комплексного підходу при розробці прогнозів негативних наслідків тривалого впливу іонізуючого випромінювання на біоту. Результати цих досліджень забезпечать теоретичну та практичну основу для розробки науково обґрунтованих підходів до подальшого удосконалення стратегії радіаційного захисту довкілля.

2. Матеріали та методи

Збір іхтіологічного матеріалу та відбір проб для гематологічного аналізу виконували переважно впродовж літніх періодів 2016 - 2023 рр. у найбільш забруднених радіонуклідами водоймах ЧЗВ: озера Глибоке, Азбучин, Далеке, Янівський затон, північно-східна (ПСЧ) та північно-західна частини (ПЗЧ) колишньої акваторії водойми-охолоджувача (ВО) ЧАЕС. Біологічними об'єктами досліджень були краснопірка звичайна *Scardinius erythrophthalmus* (Linnaeus, 1758), карась сріблястий *Carassius gibelio* (Bloch, 1782), плітка звичайна *Rutilus rutilus* (Linnaeus, 1758) та окунь звичайний *Perca fluviatilis* (Linnaeus, 1758), які є одними з найбільш поширених видів у заплавах водоймах українського Полісся.

Робота виконана на 299 екземплярах риб з водойм ЧЗВ (77 краснопірок, 85 карасів, 69 пліток і 68 окунів). Референтною водоймою було обрано оз. Підбірна (масив Осокорки, м. Київ) з низьким фоновим рівнем радіонуклідного забруднення. Кількість екземплярів риб контрольної групи становила 61 (12 краснопірок, 15 карасів, 18 пліток і 16 окунів). Використані в роботі усереднені за період досліджень величини ППД іонізуючого випромінювання для досліджених видів риб було розраховано з використанням програмного забезпечення ERICA Assessment Tool 1.0 і 2.0 [30] і наведено у мкГр/год згідно з публікаціями [12 - 14].

При відборі та обробці матеріалу застосовували загальноприйняті у гідробіологічних, радіоекологічних та гематологічних дослідженнях методи [31]. Вибірки всіх видів риб було представлено статевозрілими особинами віком 4 - 9 років. Кров від живих риб відбирали стерильною пастерівською піпеткою з гемального каналу хвостового стебла. Визначення абсолютної

кількості еритроцитів проводили меланжерним методом згідно з [32]. Мазки крові фіксували метиловим спиртом з подальшим фарбуванням за методом Паппенгейма [33]. Лейкоцитарну формулу визначали на основі 200 клітин білої крові. Для оцінки достовірності відмінності вибірок груп клітин для риб різних водойм використовували t-критерій Ст'юдента, рівень значущості $p < 0,05$. Загальне число лейкоцитів розраховували непрямым методом [32]. Клітини крові ідентифікували за класифікацією Н.Т. Іванової (1983). Кількість еритроцитів з порушеннями визначали при аналізі 3000 еритроцитів на кожному мазку і виражали в промілі. Патологічні форми клітин визначали за Л.Д. Житеневою (1989). Результати досліджень опрацьовано за допомогою пакета програм Microsoft Excel 2016 та Statistica 12.

3. Результати досліджень

ППД для риб у водоймах ЧЗВ формується за рахунок зовнішніх джерел – радіонуклідів, що депоновані у донних відкладах та містяться у воді, а також внутрішнього опромінення – радіонуклідів, накопиченого у тканинах [6, 7, 34 - 36]. Внесок різних джерел у сумарне дозове навантаження риб залежить переважно від типу живлення та розподілу радіонуклідів у різних екологічних зонах водойми. Упродовж періоду досліджень діапазони усереднених величини ППД у різних водоймах ЧЗВ становили для краснопірки 5,1 - 54,1, для карася – 19,3 - 84,5, для плітки 8,7 - 46,3, для окуня 7,8 - 46,4 мкГр/год [12 - 14]. Для риб референтної водойми ППД становила 0,05 - 0,07 мкГр/год.

Лейкоцити представляють найрізноманітнішу за складом, структурою і функціями групу клітин крові риб [37]. Вони беруть участь у неспецифічному і протимікробному захисті організму, мають високу реактивність і здатні швидко перебудовуватись у відповідь на дестабілізацію внутрішнього середовища. За дії різних подразників співвідношення окремих груп лейкоцитів може змінюватися, впливаючи на стійкість організму до вірусних і бактеріальних інфекцій [38, 39]. Згідно з дослідженнями [40 - 42] незалежно від систематичного положення тварини її кровотворна система реагує на вплив радіаційного чинника зміною кількості лейкоцитів, що призводить до пригнічення фагоцитарної реакції та погіршення інших показників специфічного і неспецифічного імунітету. З'ясовано, що біологічні ефекти, викликані радіаційним ураженням, зумовлені як безпосередньою загибеллю клітин з поступовим зниженням їхньої кількості, так і

впливом опромінення на здатність клітин, що вижили, до диференціації [43 - 45].

Відомо, що в крові риб присутні клітини всіх генерацій за рівнем диференціювання і стадії дозрівання [46]. Аналіз препаратів периферичної крові досліджених видів з водойм ЧЗВ виявив, що переважаючими клітинами у складі білої крові є лімфоцити, які становили в окремих особин до 93,4 % від усіх лейкоцитів, що є типовим для даних видів риб [32, 46]. Частка гранулоцитів (нейтрофілів, псевдоеозинофілів і псевдобазофілів) була значно меншою (таблиця).

У таблиці водойми ЧЗВ, з яких відібрано риб, розташовані у порядку збільшення дозового навантаження від найменшої ППД – 5,1 - 8,7 мкГр/год (Янівський затон) до найбільшої – 46,3 - 84,5 мкГр/год (оз. Глибоке). ППД у риб контрольних груп була на 2 - 3 порядки меншою (0,05 - 0,07 мкГр/год). Певні відмінності у величині ППД для окремих видів риб зумовлені здебільшого особливостями їхнього живлення та часом перебування у різних екологічних зонах водойм з різними рівнями дози зовнішнього опромінення, переважно від донних відкладів. Найвищі значення ППД майже в усіх водоймах відмічені для придонного виду – карася сріблястого (виняток становив Янівський затон, в якому цей вид не зустрічався), у інших видів риб з тих самих водойм ППД різнилась на 10 - 42 %.

При аналізі показників лейкоцитарної формули риб ЧЗВ порівняно з контрольними даними зареєстровано порушення співвідношення між окремими фракціями лейкоцитів. У всіх досліджуваних видів риб відмічено збільшення частки лейкоцитів, що містять у цитоплазмі різного роду гранули. При цьому простежуються як дозова, так і видова залежності. Так у краснопірки перші зміни між окремими групами лейкоцитів (лімфоцитами і нейтрофілами) спостерігали вже за ППД 10,4 і 11,8 мкГр/год і сягали максимуму за 54,1 мкГр/год, де частка нейтрофільних клітин збільшилася у 2 рази (достовірність встановлено порівняно як з контролем, так і з іншими водоймами з меншими рівнями опромінення) і з'явилися пінисті клітини, які були відсутні за меншого дозового навантаження. У плітки за ППД 8,7 - 20,2 мкГр/год відсоток нейтрофілів був вищим за контрольний рівень у 1,5 - 2,4 раза, а за потужності 46,3 мкГр/год відмічено зниження частки нейтрофілів майже у 3 рази. При цьому спостерігали значне достовірне збільшення еозинофільної та базофільної фракцій. У окуня за схожих з пліткою ППД (7,8 - 46,4 мкГр/год) відмінності вмісту гранулоцитів порівняно з контролем були виражені ще більшою мірою, відсоток нейтрофілів уже при ППД 7,8 мкГр/год був

збільшеним у 15 разів, і залишався на високому рівні у риб всіх водойм.

У карася сріблястого за ППД у діапазоні 19,3 - 27,2 мкГр/год достовірні відмінності від контролю у фракції гранулоцитів виявлено завдяки підвищеному рівню пінистих клітин, а кількість нейтрофілів, псевдобазофілів та псевдоеозинофілів були на рівні контролю. Проте, за підвищеної дози 53,1 мкГр/год (оз. Азбучин) та 84,5 мкГр/год (оз. Глибоке) у карася також з'являється реакція клітин нейтрофільного ряду, яка проявляється у збільшенні частки нейтрофілів у лейкограмі у 2,2 та 3,5 раза відповідно. Загальна кількість гранулоцитів за ППД 84,5 мкГр/год становить майже половину клітин лейкоцитарної ланки.

Підвищений відсоток клітин гранулоцитарних фракцій відповідно супроводжується зменшенням відсотку агранулоцитів. При цьому це зниження стосується лише лімфоцитів. За наявної тенденції до зниження цих клітин у всіх видів риб, достовірність як з контролем, так і з водоймами з меншим дозовим навантаженням, встановлена лише для карася сріблястого за ППД 84,5 мкГр/год. Моноцити, що мають спільну стовбурову клітину-попередника з клітинами гранулоцитарного ряду, навпаки – мали тенденцію до збільшення кількості за окремих дозових навантажень, а за відносно високих ППД встановлене достовірне збільшення частки моноцитів порівняно з контролем та озерами з меншими дозами опромінення для карася сріблястого та плітки.

Таким чином, дані статистичної обробки, а саме розрахунки достовірності змін отриманих даних, свідчать про те, що в діапазоні малих доз відбуваються значні коливання показників лейкоцитарної формули, а за збільшеної ППД (вище за 40 - 50 мкГр/год) рівень змін набуває статистичної достовірності порівняно як з контролем, так і з водоймами з відносно низьким рівнем ППД. Можна припустити, що за малих доз опромінення, проявляються ефекти, пов'язані більшою мірою з індивідуальними особливостями, станом імунної системи, радіочутливістю тощо. В діапазоні підвищених доз опромінення істотно зростає кількість клітин, які зазнають радіаційного ураження (можливо летального або потенційно летального) і виразність ефектів набуває дозової залежності.

В оцінці стану системи крові важливим є не лише відсоткове співвідношення окремих фракцій лейкоцитів, але й їхня загальна абсолютна кількість. Аналіз трендів поліноміальної апроксимації отриманих кількісних показників (рис. 1, а) свідчить, що зміни абсолютної кількості лейкоцитів у дослідних видів риб укладаються у

Лейкоцитарна формула риб досліджених водойм, % $\pm$ SD

Водойма	ППД, мкг/год	Роки відбору	N	Бластні клітини	Лімфоцити	Моноцити	Псевдо-еозинофіли	Псевдо-базофіли	Нейтрофіли	Пікністні клітини	Агранулоцити	Гранулоцити
Краснопірка												
Контроль	0,05 $\pm$ 0,02	2016, 2021	12	1,0 $\pm$ 0,05	93 $\pm$ 5,5	1,0 $\pm$ 0,3	2,1 $\pm$ 0,2	0,2 $\pm$ 0,05	2,7 $\pm$ 0,2	0*	94 $\pm$ 5,5	5,0 $\pm$ 0,3
Янівський затон	5,1 $\pm$ 1,5	2017-2021, 2023	21	0,9 $\pm$ 0,8	92,1 $\pm$ 8,1	1,2 $\pm$ 0,5	2,1 $\pm$ 0,1	0,5 $\pm$ 0,4	3,2 $\pm$ 0,5	0	93,3 $\pm$ 8,1	5,8 $\pm$ 0,5
ПЗЧ ВО	10,4 $\pm$ 3,4	2016, 2018, 2023	18	1,0 $\pm$ 0,5	90,4 $\pm$ 9,5	1,6 $\pm$ 0,05 ¹	0,1 $\pm$ 0,5 ¹	4,1 $\pm$ 1,3 ^{1,2}	2,8 $\pm$ 0,1	0	92 $\pm$ 9,2	7,0 $\pm$ 3,3
Оз. Далеке	11,8 $\pm$ 2,9	2016-2018, 2021	18	0,5 $\pm$ 0,4	91,8 $\pm$ 8,5	1,1 $\pm$ 0,05	2,9 $\pm$ 0,3	1,6 $\pm$ 0,1 ^{2,3}	2,1 $\pm$ 1,5	0	92,9 $\pm$ 12,1	6,6 $\pm$ 0,2
Оз. Глибке	54,1 $\pm$ 15,4	2017, 2019-2020	20	0,4 $\pm$ 0,3	90,4 $\pm$ 9,9	1,1 $\pm$ 0,02	2,5 $\pm$ 0,5	0,3 $\pm$ 0,05 ^{3,5}	4,5 $\pm$ 0,5 ^{1,2,3,5}	0,8 $\pm$ 0,3 ^{1,2,5}	91,5 $\pm$ 10,5	7,3 $\pm$ 0,5 ^{1,2,5}
Пітка												
Контроль	0,05 $\pm$ 0,02	2019, 2021	18	1,7 $\pm$ 0,8	84,7 $\pm$ 5,1	0,6 $\pm$ 0,05	5,3 $\pm$ 0,5	0	4,7 $\pm$ 0,6	3,0 $\pm$ 0,6	85,3 $\pm$ 5,1	13 $\pm$ 0,6
Янівський затон	8,7 $\pm$ 3,1	2016, 2023	16	0	78,8 $\pm$ 10,2	2,0 $\pm$ 0,5 ¹	6,9 $\pm$ 0,9	0,1 $\pm$ 0,05 ¹	11,2 $\pm$ 1,5 ¹	1,0 $\pm$ 0,02 ¹	80,8 $\pm$ 10,1	19,2 $\pm$ 0,8 ¹
ПЗЧ ВО	13,0 $\pm$ 2,5	2016, 2018, 2023	18	0	81,9 $\pm$ 11,2	1,7 $\pm$ 0,5 ¹	4,1 $\pm$ 0,9 ^{1,2}	0,6 $\pm$ 0,1 ^{1,2}	6,9 $\pm$ 1,5 ²	4,8 $\pm$ 1,1 ²	83,6 $\pm$ 6,2	16,4 $\pm$ 1,5 ^{1,2}
ПСЧ ВО	20,2 $\pm$ 5,4	2018, 2023	15	0	83,7 $\pm$ 10,8	0,8 $\pm$ 0,04	6,3 $\pm$ 0,1 ^{1,3}	0	6,9 $\pm$ 1,1 ²	2,3 $\pm$ 0,9 ^{2,3}	84,5 $\pm$ 6,8	15,5 $\pm$ 1,1 ^{1,2}
Оз. Глибке	46,3 $\pm$ 15,6	2016-2017, 2020, 2021	20	0	82,4 $\pm$ 9,1	2,3 $\pm$ 0,5 ^{1,4}	9,2 $\pm$ 1,5 ^{1,2,3,4}	0,8 $\pm$ 0,1 ^{1,2,4}	1,6 $\pm$ 0,05 ^{1,2,3,4}	3,7 $\pm$ 0,8 ²	83,2 $\pm$ 7,1	15,3 $\pm$ 0,5 ^{1,2}
Окунь												
Контроль	0,05 $\pm$ 0,02	2018, 2020	16	0,3 $\pm$ 0,2	96,4 $\pm$ 5,5	0,9 $\pm$ 0,1	1,2 $\pm$ 0,3	0	1,2 $\pm$ 0,01	0	97,3 $\pm$ 5,5	2,4 $\pm$ 0,2
Янівський затон	7,8 $\pm$ 2,1	2016, 2017, 2020	12	0,6 $\pm$ 0,2 ¹	88,5 $\pm$ 6,8	0,7 $\pm$ 0,05	1,0 $\pm$ 0,05	0	9,2 $\pm$ 0,9 ¹	0	89,2 $\pm$ 6,8	10,2 $\pm$ 0,8 ¹
ПЗЧ ВО	11,5 $\pm$ 2,7	2016, 2019, 2020, 2023	18	0	88,1 $\pm$ 6,3	2,1 $\pm$ 0,9 ¹	2,1 $\pm$ 0,1 ¹	0	7,7 $\pm$ 0,2 ^{1,2}	0	90,2 $\pm$ 5,1	9,8 $\pm$ 0,2 ¹
ПСЧ ВО	18,7 $\pm$ 4,3	2016, 2019, 2023	20	0	81,9 $\pm$ 9,1	0,7 $\pm$ 0,1 ³	3,0 $\pm$ 0,5 ^{1,3}	0	12,4 $\pm$ 1,1 ^{1,2,3}	2,0 $\pm$ 0,5 ¹	82,6 $\pm$ 9,1 ¹	17,4 $\pm$ 0,5 ^{1,2,3}
Оз. Глибке	46,4 $\pm$ 13,5	2017, 2021	18	0	86,0 $\pm$ 3,5 ¹	0,5 $\pm$ 0,05 ^{1,2,3}	1,7 $\pm$ 0,5 ⁴	0	11,8 $\pm$ 1,5 ^{1,2,3}	0	86,5 $\pm$ 3,5 ¹	13,5 $\pm$ 1,5 ^{1,2,3,4}
Карась сріблястий												
Контроль	0,07 $\pm$ 0,03	2017-2019	15	0	89,5 $\pm$ 4,6	1,6 $\pm$ 0,5	3,4 $\pm$ 1,1	1,0 $\pm$ 0,5	4,5 $\pm$ 0,1	0	91,1 $\pm$ 2,5	8,9 $\pm$ 1,1
ПЗЧ ВО	19,3 $\pm$ 5,2	2019- 2021	20	0	87,2 $\pm$ 5,5	1,5 $\pm$ 0,5	3,8 $\pm$ 0,5	0,6 $\pm$ 0,5	4,7 $\pm$ 0,5	2,2 $\pm$ 0,5 ¹	88,7 $\pm$ 5,5	11,3 $\pm$ 4,5 ¹
ПСЧ ВО	27,2 $\pm$ 7,1	2017, 2019, 2021, 2023	20	0	86,4 $\pm$ 5,2	1,4 $\pm$ 0,6	3,4 $\pm$ 0,3	0,5 $\pm$ 0,1	4,8 $\pm$ 0,5	3,5 $\pm$ 0,1 ^{1,3}	87,8 $\pm$ 5,2	12,2 $\pm$ 2,1 ¹
Оз. Азбучин	53,1 $\pm$ 11,5	2016, 2020, 2021, 2023	22	1,0 $\pm$ 0,7	77,8 $\pm$ 5,7 ¹	1,5 $\pm$ 0,5	5,4 $\pm$ 0,3 ^{1,3,6}	0,9 $\pm$ 0,8	9,9 $\pm$ 1,1 ^{1,3,6}	3,5 $\pm$ 0,1 ^{1,3}	79,3 $\pm$ 3,5 ¹	19,7 $\pm$ 6,1 ^{1,3}
Оз. Глибке	84,5 $\pm$ 24,7	2016-2017, 2019-2021	23	0	47,9 $\pm$ 5,1 ^{1,3,6}	7,6 $\pm$ 5,1 ^{1,3,6}	26,0 $\pm$ 5,1 ^{1,3,6}	0,9 $\pm$ 0,6	15,9 $\pm$ 2,5 ^{1,3,6}	1,7 $\pm$ 0,3 ^{1,6}	55,5 $\pm$ 5,1 ^{1,3,6}	44,5 $\pm$ 4,5 ^{1,3,6}

Примітки. * - Клітини не виявлені; 1 – достовірна відмінність від контролю; 2 – від Янівського затону; 3 – від ПЗЧ ВО; 4 – від ПСЧ ВО; 5 – від оз. Далеке; 6 – від оз. Азбучин.

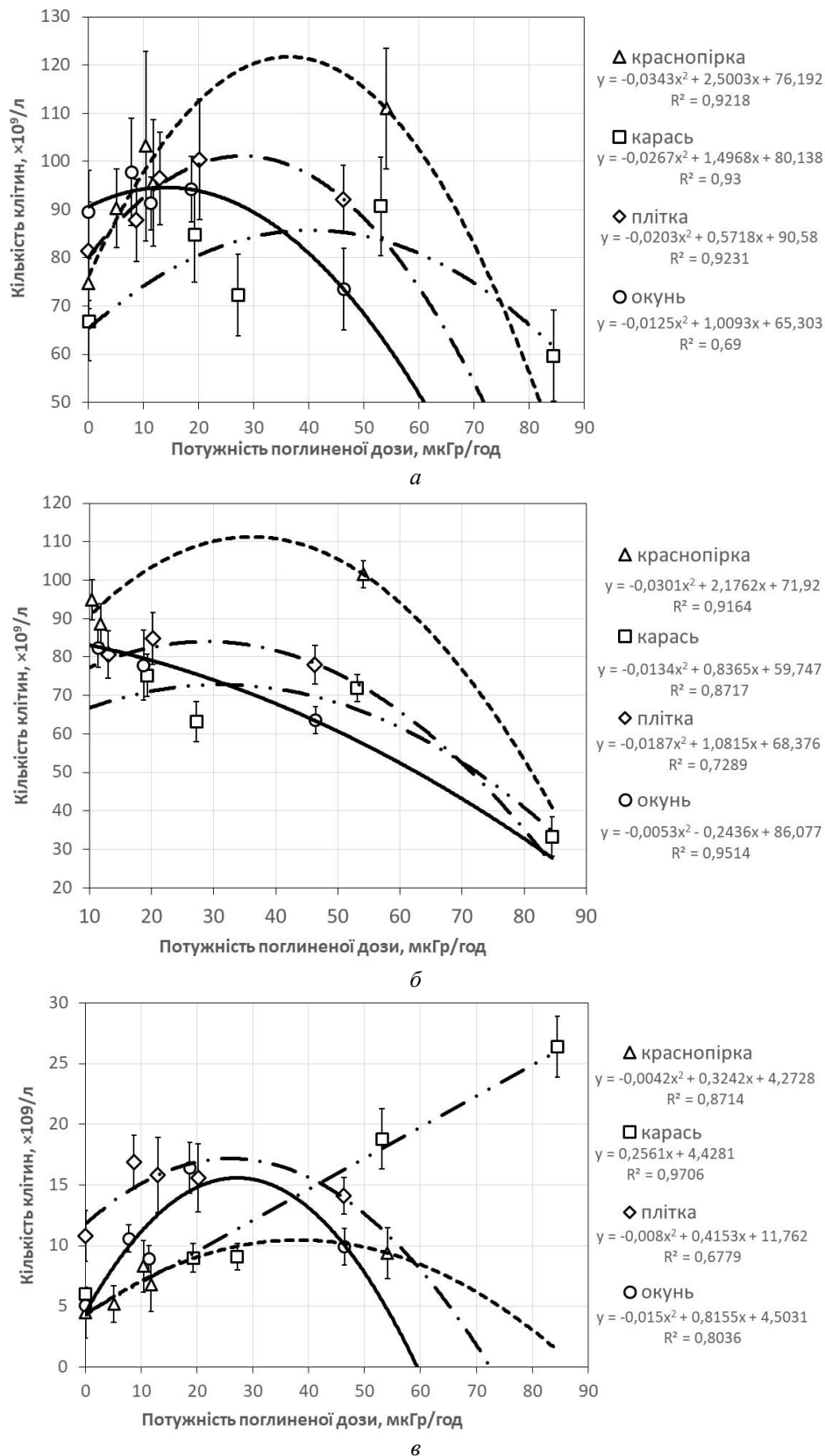


Рис. 1. Залежність динаміки абсолютної кількості лейкоцитів (а), агранулоцитів (б) і гранулоцитів (в) від ППД у периферичній крові досліджених видів риби.

модель з первинним збільшенням кількості лейкоцитів у міру зростання ППД. Пороговою дозою, до якої відбувається підвищення кількості клітин білої крові у більшості досліджених видів

є 30 - 40 мкГр/год. Найбільш високі показники зростання кількості лейкоцитів відмічено у краснопірки (до 70 % від контролю), у карася сріблястого та плітки цей показник був на рівні 24 та

30 % відповідно. За дії більш високих доз опромінення кількість лейкоцитів у крові риб починає поступово зменшуватися, що свідчить про погіршення стану кровотворення. Найбільш радіаційно чутливим виявився окунь, порогова доза для якого за кількісними показниками лейкоцитів, становила близько 15 мкГр/год, а за ППД 46,4 мкГр/год кількість лейкоцитів знизилася на 18 % порівняно з контролем, що є найнижчим показником серед досліджених видів риб.

Наведені у таблиці дані вказують на те, що в усіх видів риб відбувається перерозподіл лейкоцитарної формули в бік зменшення відсотку агранулоцитів та відповідного збільшення кількості клітин гранулоцитарної фракції. Тобто, можна припустити, що зі збільшенням дози опромінення у риб спостерігається певна тенденція до зниження вмісту клітин, які відповідають за специфічний імунітет. Проте за абсолютними показниками (див. рис. 1, б і в) до певного порогового рівня – навпаки, відмічене підвищення вмісту як агранулоцитів, серед яких більшість становлять лімфоцити, так і гранулоцитів, що вказує на активацію процесів імунного захисту організму.

Достатньо добре простежується видова особливість реагування системи крові на хронічну дію радіаційного чинника. Так у краснопірки відмічено найвищі кількісні показники як лімфоцитарної, так і гранулоцитарної фракції, що вказує на збалансованість реакції системи крові на радіаційний вплив з можливим підвищенням резистентності цього виду риб. Дещо меншою, але теж достатньо високою була реакційна здатність системи крові у плітки та карася сріблястого. Але в останнього за умов опромінення ППД більшою за 50 мкГр/год відбувся зрив компенсаторних можливостей зі значним збільшенням кількості гранулоцитів та зниженням у 2 рази кількості лімфоцитів, наслідком чого, за даними [3, 43], може бути зниження імунітету організму риб та скорочення чисельності популяції у водоймі. Вміст гранулоцитів при цьому закономірно збільшувався як за рахунок нейтрофілів, так і фракції псевдоеозинофілів. З одного боку, це може бути пов'язано з підвищеним ризиком інфікування завдяки зниженню імунного захисту, а з іншого – бути відповіддю на локальні осередки пошкоджень у місцях розпаду інкорпорованих радіонуклідів. Збільшення кількості нейтрофілів, основною функцією яких є фагоцитоз (поглинання бактерій, грибків і продуктів розпаду тканин), а також участь у неспецифічному захисті організму, може свідчити про глибину порушень у мієлопоезі та у кровотворних орга-

нах риб у цілому, та визначається дозою опромінення і функціональним станом кровотворної системи [43, 46]. Порівняно високий відсоток моноцитів (клітин, що фагоцитують продукти розпаду клітин і тканин, а також поглинають бактерії) у карася з оз. Глибокого свідчить про збільшення кількості пошкоджених клітинних елементів. Зазвичай зростання кількості моноцитів у крові збігається з посиленням розпаду не лише клітин червоної крові, але й із загибеллю самих лейкоцитів [41, 47], що підтверджує аналіз лейкограм досліджених видів. Аналогічний ще більш виражений дисбаланс між даними фракціями лейкоцитів відмічено у окуня, починаючи вже з 10 мкГр/год, що може бути пов'язано з більш високою видовою радіочутливістю.

Таким чином, зареєстровані дози опромінення можуть розглядатися як один з видів стресу, при якому зміни у співвідношенні агранулоцитів і гранулоцитів спрямовані на оптимальне підтримання адаптаційних і репараційних можливостей організму. В умовах радіаційного впливу змінюється процес диференціювання стовбурових клітин у бік гранулопоезу та мієлопоезу, а процес лімфопоезу пригнічується [41, 47]. Виявлений моноцитоз у риб оз. Глибокого також є важливою особливістю клітинної реакції системи крові. Це явище зазвичай пов'язане з активацією захисних і пристосувальних реакцій на певні негативні впливи, при яких моноцити беруть участь у процесі фагоцитозу, сприяють відновленню тканин і підтримують імунні властивості організму [40, 42, 48]. Незрілі форми моноцитарно-макрофагальної лінії є мішенями радіаційного впливу, що впливає на кількісні параметри моноцитів [41], але з активацією компенсаторного процесу пул макрофагів оновлюється і показники нормалізуються.

Високі показники гранулоцитів, а саме нейтрофілів у периферичній крові риб оз. Глибокого можна пояснити значною кількістю в руслі крові ушкоджених клітин, оскільки нейтрофіли, окрім фагоцитозу, є індукторами імунної відповіді, володіють цитотоксичною функцією, виділяють продукти секреції, беруть участь у процесах резорбції та проліферації, запаленні та репарації тканин [41, 42]. Збільшення числа нейтрофілів, еозинофілів і базофілів можливо є реактивним станом з боку системи кровотворення, спрямованим на формування захисно-пристосувальних реакцій, компенсуючи тим самим їхню низьку життєздатність [32, 41, 47].

Аналогічні компенсаторно-пристосувальні реакції, що супроводжуються лімфоцитозами, збільшенням гранулоцитарної фракції периферичної крові, дисбалансом кістковомозкового

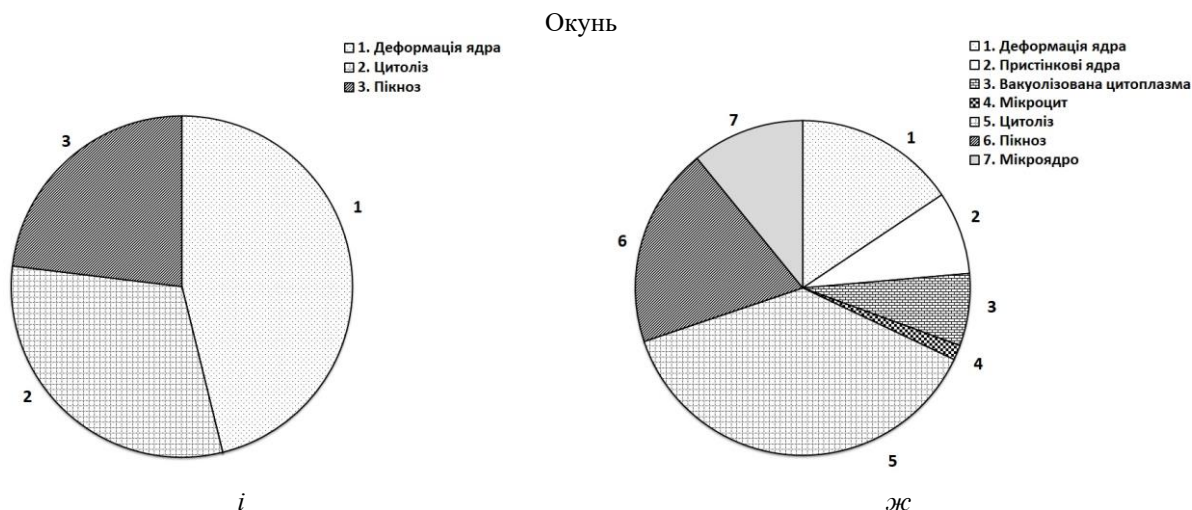


Рис. 2. Співвідношення показників морфологічних порушень еритроцитів краснопірки, карася сріблястого, плітки і окуня у водоймах ЧЗВ: а, в, д, і – контрольні водойми; б, г, е, ж – водойми ЧЗВ, %.

Натомість у периферичному руслі крові риб з водойм ЧЗВ спектр порушень клітин еритроцитарної ланки був набагато ширшим (див. рис. 2, б, г, е, ж). Зокрема у карася реєстрували 11 типів морфологічних порушень еритроцитів – деформацію ядра, пристінкове ядро, вакуолізовану цитоплазму, пікноз, хроматіноліз, цитоліз, мікроцити, мікроядра, двоядерні, амітоз і перегородку в ядрі. У краснопірки і плітки було зареєстровано 8 типів порушень клітин, у окуня – 7. Середня загальна кількість порушень для окуня з різних водойм ЧЗВ становила 12,2 %, для крас-

нопірки – 16,0 %, для карася – 19,2 %, для плітки – 21,2 % що, відповідно, у 9,4, 7,6, 12,0 та 17,7 рази вище за контрольні показники.

Усі типи морфологічних порушень еритроцитів можна об'єднати у дві основні групи: структурні та пов'язані з патологією поділу. До першої групи порушень еритроцитів відносяться деформація ядра, пристінкове ядро, вакуолізована цитоплазма, пікноз, цитоліз, мікроцит і хроматіноліз, а до другої – мікроядро, двоядерні, амітоз та перегородка в ядрі.

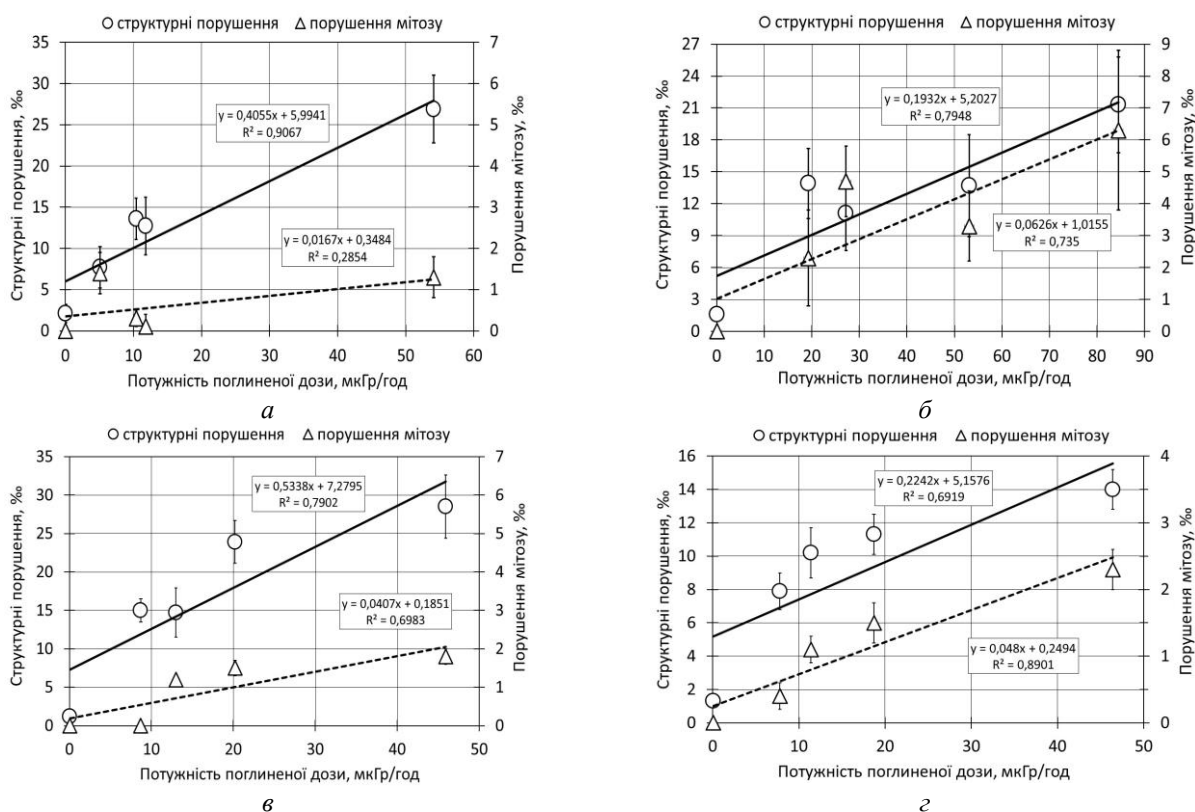


Рис. 3. Лінійна залежність частоти різних груп морфологічних порушень еритроцитів периферичної крові краснопірки (а), карася сріблястого (б), плітки (в) і окуня (г) від ППД.

Оцінка залежності кількості еритроцитів з морфологічними порушеннями від ППД дала змогу виявити вірогідне збільшення кількості аномальних клітин у периферичній крові всіх досліджених риб з дозою опромінення та встановити певні видові особливості змін в еритроцитарній ланці периферичної крові (рис. 3).

У краснопірки з водойм ЧЗВ загальна кількість еритроцитів зі структурними порушеннями залежно від дози збільшилася майже втричі ($R^2 = 0,91$) з 7,7 до 26,9 % (див. рис. 3, а). Серед цих пошкоджень переважали еритроцити з вакуолізованою цитоплазмою, що утворюються внаслідок набрякання мітохондрій і деструкції мембран органел. За ППД 5,1 мкГр/год їхня кількість становила $3,2 \pm 0,8$ %, а за 54,1 мкГр/год – $13,2 \pm 1,5$ %. У риб контрольної вибірки цей тип порушень був відсутній. Пошкодження, пов'язані з поділом клітин у крові краснопірки за ППД 5,1 мкГр/год (Янівський затон), були представлені в основному еритроцитами з мікроядрами – $1,4 \pm 0,1$ %. За максимальної для краснопірки ППД – 54,1 мкГр/год зареєстровано зростання типів клітин з порушенням мітозу, а саме двоядерних і з мікроядрами, загальна кількість яких становила $1,3 \pm 0,1$ %.

У крові плітки з водойм ЧЗВ (див. рис. 3, в) загальна кількість структурних порушень еритроцитів у дослідженому діапазоні ППД від 8,7 до 46,3 мкГр/год мала подібну для краснопірки спрямованість і становила від 15 до 28,5 %. Проте склад морфологічних змін був дещо іншим. Так, серед них переважали еритроцити з цитолізом, що виникають внаслідок як старіння клітин, так і при важких токсикозах, за дії гемолітичних отрут [32, 41, 51]. Крім того, у плітки, починаючи з дозового навантаження 20,2 мкГр/год, реєстрували появу клітин з вакуолізованою цитоплазмою – $0,4 \pm 0,05$ % і з хроматінолізом – $3,5 \pm 0,5$ %. Зі зростанням ППД спостерігали дозозалежний вихід мікроцитів від $0,7 \pm 0,05$ до $2,8 \pm 0,5$ %. Появу мікроцитів у крові зазвичай пов'язують з кисневою недостатністю або наявністю різних забруднювачів у середовищі існування [32]. За ППД 8,7 - 20,2 мкГр/год крім мікроцитів, відмічали поступове збільшення кількості еритроцитів з пікнозом і цитолізом. Проте за подальшого зростання ППД до 46,3 мкГр/год кількість таких клітин знизилась у 2,1 раза, що можливо пов'язано із загибеллю цих клітин за дії відносно великих доз опромінення. Аналіз порушень, пов'язаних з патологією процесів поділу ядра, виявив збільшення кількості клітин з мікроядрами зі зростанням дозового навантаження у діапазоні 13,0 - 46,3 мкГр/год – від $1,2 \pm 0,1$ до $1,8 \pm 0,02$ %.

У крові карася сріблястого з водойм ЧЗВ (див. рис. 3, б), на відміну від інших видів риб, серед морфологічних порушень переважали еритроцити з хроматінолізом. У діапазоні ППД 19,3 - 53,1 мкГр/год загальна кількість порушень в еритроцитах була майже на одному рівні – $13,9 \pm 1,1$ - $13,7 \pm 1,5$ %. За підвищення ППД до 84,5 мкГр/год кількість структурних порушень збільшилася до $21,3 \pm 1,7$ % – в середньому у 1,7 раза. При цьому спостерігали збільшення еритроцитів з хроматінолізом до $8,1 \pm 1,1$ % і деформацією ядра до $5,8 \pm 0,5$ %. Оцінка частоти клітин з порушеннями в результаті патології мітозу в периферичній крові карася виявила більшу різноманітність цих порушень порівняно з іншими видами риб. Було зареєстровано клітини з амітозом, двоядерні, з мікроядрами, а також з перегородкою в ядрі. Загальна кількість таких порушень становила 6,3 %. Крім того, слід зазначити, що у карася кількість клітин з патологією процесів поділу була найвищою порівняно з іншими видами (у 3 - 6 разів).

Аналіз змін еритроїдної ланки периферичної крові окуня (див. рис. 3, г) вказує на те, що у цього виду кількість еритроцитів зі структурними порушеннями в діапазоні доз 7,8 - 18,7 мкГр/год була подібною до інших видів. Натомість за максимальних дозових навантажень (46,4 мкГр/год) клітини з такими патологіями зустрічались у 1,5 - 2 рази рідше. При цьому це був переважно цитоліз, у той час як, наприклад, у плітки, яка мала близькі з окунем дозові навантаження, переважали еритроцити з деформацією ядра. Як і у плітки, у окуня встановлено дозову залежність кількості еритроцитів з мікроядрами за ППД 7,8 - 46,4 мкГр/год – від $0,4 \pm 0,01$ до $2,3 \pm 0,05$ %, що може свідчити про зниження генетичної стабільності риб в умовах хронічного впливу іонізуючого випромінювання.

Оцінка залежності загальної кількості еритроцитів зі структурними порушеннями від ППД дала змогу виявити вірогідне збільшення кількості аномальних клітин у периферичній крові всіх досліджених видів риб у такому порядку: у краснопірки ($R = 0,91$) – $2,1 \pm 0,8$ % (0,05 мкГр/год, референтна водойма) → $7,7 \pm 1,8$ % (5,08 мкГр/год, Янівський затон) → $12,7 \pm 2,5$ % (11,76 мкГр/год, оз. Далеке) → $13,6 \pm 2,2$ % (10,35 мкГр/год, ПЗЧ ВО) → $26,9 \pm 3,1$ % (54,06 мкГр/год, оз. Глибоке); у карася сріблястого ($R = 0,79$) – $1,6 \pm 0,3$ % (0,07 мкГр/год, референтна водойма) → $11,1 \pm 2,5$ % (27,20 мкГр/год, ПСЧ ВО) → $13,7 \pm 1,1$ % (53,10 мкГр/год, оз. Азбучин) → $13,9 \pm 2,1$ % (19,30 мкГр/год, ПЗЧ ВО ЧАЕС) → $21,3 \pm 2,5$ %

(84,50 мкГр/год, оз. Глибоке); у плітки ($R = 0,79$) – $1,2 \pm 0,2$ ‰ (0,05 мкГр/год, референтна водойма) → $15,0 \pm 1,5$ ‰ (8,7 мкГр/год, Янівський затон) → $14,7 \pm 3,2$ ‰ (13,0 мкГр/год, ПЗЧ ВО) → $23,9 \pm 2,8$ ‰ (20,2 мкГр/год, ПСЧ ВО) → $28,5 \pm 4,1$ ‰ (45,9 мкГр/год, оз. Глибоке); у окуня ($R = 0,69$) – $1,3 \pm 0,5$ ‰ (0,05 мкГр/год, референтна водойма) → $7,9 \pm 1,1$ ‰ (7,8 мкГр/год, Янівський затон) → $10,2 \pm 1,5$ ‰ (11,4 мкГр/год, ПЗЧ ВО) → $11,3 \pm 1,2$ ‰ (18,7 мкГр/год, ПСЧ ВО) → $14,0 \pm 1,2$ ‰ (46,4 мкГр/год, оз. Глибоке).

Виявлена також позитивна кореляція між ППД та кількістю еритроцитів з патологією мітозу у окуня ($R = 0,89$), карася сріблястого ($R = 0,74$) і плітки ($R = 0,70$). У краснопірки, за наявності порівняно низької кількості клітин з порушеннями мітотичного поділу, достовірної залежності цього показника від ППД не зареєстровано ($R = 0,29$) (див. рис. 3, а). Слід також зазначити, що у досліджених видів риб контрольної групи порушень мітотичного поділу клітин червоної крові не виявлено.

Враховуючи відмінності екологічних ніш, які займають досліджені види у водоймах, можна припустити, що більш значний внесок у виникнення еритроцитів з патологією мітозу формується за рахунок зовнішнього γ -випромінювання ^{137}Cs , більше, ніж 90 % якого у непроточних водоймах ЧЗВ депоновано у донних відкладах [6, 7, 52]. Саме для карася, який веде придонний спосіб життя і зазнає підвищеного дозового навантаження за рахунок зовнішнього γ -опромінення від донних відкладів, притаманний більш високий рівень порушень мітотичного поділу клітин червоної крові. Краснопірка, окунь і плітка мешкають переважно у порівняно радіаційно-сприятливій пелагічній зоні водойм, де внесок зовнішнього γ -опромінення до загальної ППД істотно менший, а рівень опромінення, зумовлений β -випромінюючими радіонуклідами, що інкорпоровані у тканинах, є подібний до такого як у карася сріблястого. Але це припущення потребує підтвердження на підставі подальших більш ретельних досліджень із залученням інших представників рибного населення водойм ЧЗВ.

4. Висновки

Дослідження кровотворної системи риб у водоймах ЧЗВ у градієнті ППД 5,1 - 84,5 мкГр/год дали змогу встановити пороговий рівень дозового навантаження, до якого відбува-

ється підвищення абсолютної кількості лейкоцитів у периферичній крові, що свідчить про активацію компенсаторних процесів у організмі риб. Для краснопірки, плітки та карася сріблястого цей рівень був у межах 30 - 40 мкГр/год, а для окуня становив близько 15 мкГр/год поточної дози опромінення. За дії більш високого дозового навантаження кількість лейкоцитів у крові риб зменшувалась, і для деяких видів досягала рівня, який був на 12 - 18 % нижче значень контрольної вибірки, що вказує на погіршення процесів кровотворення.

Якісний аналіз еритроцитів у крові риб ЧЗВ виявив численні структурні порушення клітин, а також порушення, пов'язані з патологією мітотичного поділу. Загальна кількість морфологічних порушень клітин червоної крові за максимальних дозових навантажень перевищувала контрольні показники для краснопірки у 12,1, окуня – у 12,4, карася сріблястого – у 14,2 та плітки – у 38,3 раза. Серед порушень еритроцитів превалювали клітини з деформацією ядер, вакуолізованою цитоплазмою, хроматінолізом та цитолізом.

Таким чином, дослідження реакцій кровотворної системи риб у водоймах ЧЗВ виявили, що система крові досліджуваних видів реагує на тривале хронічне опромінення активацією компенсаторно-адаптаційних процесів, що виявляються у зміні кількості лейкоцитів та перерозподілом окремих видів клітин у лейкограмі. Поряд з цим відмічено значне збільшення патологічних змін структури ядер та цитоплазми еритроцитів. Радіаційне навантаження, вплив якого перевищує допустимі можливості організму, спричиняє значне скорочення абсолютної кількості лейкоцитів, що призводить до погіршення стану імунітету організму і, як наслідок, підвищує ризик гельмінтезації риб, а також бактеріальних і вірусних захворювань. Зміни у лейкоцитарній та еритроцитарній ланках периферичної крові риб за дії порівняно високих доз опромінення можуть призвести до поступового зниження пристосувальних реакцій організму, погіршення його захисних функцій та до скорочення чисельності популяцій рибного населення у водоймах ЧЗВ.

Роботу виконано за підтримки Національного фонду досліджень України (проект № 2023.03/0156) і Національної академії наук України, а також у співробітництві з Державним спеціалізованим підприємством «Екоцентр» ДАЗВ України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. А.Н. Марей. *Санитарная охрана водоемов от загрязнений радиоактивными веществами* (Москва: Атомиздат, 1976) 224 с. / A.N. Marei. *Sanitary Protection of Water Bodies from Radioactive Contamination* (Moskva: Atomizdat, 1976) 224 p. (Rus)
2. И.А. Шеханова. *Радиоэкология рыб* (Москва: Высш. школа, 1983) 208 с. / I.A. Shekhanova. *Radioecology of Fish* (Moskva: Vysshaya Shkola, 1983) 208 p. (Rus)
3. Г.С. Шлейфер, И.А. Шеханова. Влияние ионизирующей радиации на некоторые факторы иммунитета рыб. В кн.: *Радиоэкология животных*: Материалы I Всесоюзной конференции, Москва, 24 - 27 января 1977 (Москва: Наука, 1977) с. 93. / G.S. Shleifer, I.A. Shekhanova. Influence of ionizing radiation on some factors of fish immunity. In: *Radioecology of Animals: Proceedings of the First All-Union Conference*, Moskva, January 24 - 27, 1977 (Moskva: Nauka; 1977) p. 93. (Rus)
4. D. Gudkov et al. Aquatic plants and animals in the Chernobyl Exclusion Zone: Effects of long-term radiation exposure on different levels of biological organization. In: V. Korogodina et al. (Eds.) *Genetics, Evolution and Radiation* (Cham: Springer, 2017) p. 287.
5. A. Lerebours et al. Impact of environmental radiation on the health and reproductive status of fish from Chernobyl. *Environ. Sci. Technol.* 52 (2018) 9442.
6. D.I. Gudkov et al. The main radionuclides and dose formation in fish of the Chernobyl NPP exclusion zone. *Radiat. Biol. Radioecol.* 48 (2008) 48.
7. D.I. Gudkov et al. Dynamics of the content and distribution of the main dose forming radionuclides in fishes of the exclusion zone of the Chernobyl NPS. *Hydrobiol. J.* 44 (2008) 87.
8. O.Ye. Kaglyan et al. Strontium-90 in fish from the lakes of the Chernobyl Exclusion Zone. *Radio-protection* 44 (2009) 945.
9. А.Е. Каглян и др. Радионуклиды в аборигенных видах рыб Чернобыльской зоны отчуждения. *Ядерна фізика та енергетика* 13 (2012) 306. / O.Ye. Kaglyan et al. Radionuclides in the indigenous fish species of the Chernobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 13 (2012) 306. (Rus)
10. D.I. Gudkov et al. The distribution of the radionuclides in the main components of lake ecosystems within the Chernobyl NPP exclusion zone. *Radiat. Biol. Radioecol.* 45 (2005) 271.
11. D.I. Gudkov et al. ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, and ^{241}Am in the components of aquatic ecosystems of the Krasnenskaya floodplain of the Pripjat river. *Hydrobiol. J.* 41 (2005) 75.
12. O.Ye. Kaglyan et al. Changes in radiation exposure rate of fish of the cooling pond of the Chornobyl NPS and Lake Azbuchyn after water level lowering. *Hydrobiol. J.* 59 (2023) 96.
13. A.Y. Kaglyan et al. Fish of the Chernobyl exclusion zone: Modern levels of radionuclide contamination and radiation doses. *Hydrobiol. J.* 55 (2019) 81.
14. О.Є. Каглян та ін. Потужність поглиненої дози зовнішнього опромінення представників іхтіофауни озер у Чорнобильській зоні відчуження. *Ядерна фізика та енергетика* 25 (2024) 141. / A.Ye. Kaglyan et al. The absorbed dose rate of external exposure to representatives of ichthyofauna of lakes in the Chornobyl Exclusion Zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 25 (2024) 141. (Ukr)
15. V.V. Belyaev et al. Reconstruction of the absorbed dose of ionizing radiation in fish of the Glyboke Lake over the early phase of the Chernobyl accident. *Hydrobiol. J.* 57 (2021) 86.
16. V.V. Belyaev et al. Radiation dose reconstruction for higher aquatic plants and fish in Glyboke Lake during the early phase of the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 263 (2023) 107169.
17. I.I. Kryshev. Radioactive contamination of aquatic ecosystems following the Chernobyl accident. *J. Environ. Radioact.* 27 (1995) 207.
18. М.І. Кузьменко та ін. *Техногенні радіонукліди у прісноводних екосистемах* (Київ: Наук. думка, 2010) 262 с. / M.I. Kuzmenko et al. *Technogenic Radionuclides in Freshwater Ecosystems* (Kyiv: Naukova Dumka, 2010) 262 p. (Ukr)
19. О.Є. Каглян та ін. Динаміка питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у представників іхтіофауни водойм Чорнобильської зони відчуження. *Ядерна фізика та енергетика* 22 (2021) 62. / A.Ye. Kaglyan et al. Dynamics of specific activity of ^{90}Sr and ^{137}Cs in representatives of ichthyofauna of Chornobyl Exclusion Zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 22 (2021) 62. (Ukr)
20. И.А. Шеханова. Радиоэкологические аспекты защиты поверхностных вод при мирном использовании ядерной энергии. В кн.: *Проблемы и задачи радиоэкологии животных*. Отв. ред. А.И. Ильенко (Москва: Наука, 1980) с. 135. / I.A. Shekhanova. Radioecological aspects of surface water protection in the peaceful use of nuclear energy. In: A.I. Ilyenko (Ed.). *Problems and Tasks of Animal Radioecology* (Moskva: Nauka, 1980) p. 135. (Rus)
21. V.R. Mikryakov et al. Comparative characteristics of leucocytes compositions in the crucian carp *Carassius carassius* (Cyprinidae) from the water-bodies of the Chernobyl exclusion zone and from the Rybinsk reservoir. *J. Ichthyol.* 53 (2013) 753.
22. Е.А. Пряхин и др. Оценка уровня патологии эритроцитов в периферической крови у плотвы (*Rutilus rutilus* L.) из водоемов с разным уровнем радиоактивного загрязнения. Радиационная биология. Радиоэкология. 52 (2012) 616. / E.A. Pryakhin et al. Assessment of erythrocyte pathology level in peripheral blood of roach (*Rutilus rutilus* L.) from water bodies with different levels of radioactive contamination. *Radiat. Biol. Radioecol.* 52 (2012) 616. (Rus)

23. K. Al-Sabti, C.D. Metcalfe. Fish micronuclei for assessing genotoxicity in water. *Mutat. Res./Genet. Toxicol.* 343 (1995) 121.
24. S. Anbumani, M.N. Mohankumar. Gamma radiation induced micronuclei and erythrocyte cellular abnormalities in the fish *Catla catla*. *Aquat. Toxicol.* 122-123 (2012) 125.
25. N.A. Pomortseva, D.I. Gudkov. Effect of additional acute irradiation on cytomorphological abnormalities of erythrocytes of the Prussian carp (*Carassius gibelio* Bloch) from water body contaminated with radionuclides. *Probl. Radiat. Med. Radiobiol.* 24 (2019) 270.
26. T.G. Sazykina, A.I. Kryshev. EPIC database on the effects of chronic radiation in fish: Russian/FSU data. *J. Environ. Radioact.* 68(1) (2003) 65.
27. K. Beaugelin-Seiller, C. Della-Vedova, J. Garnier-Laplace. Transforming acute ecotoxicity data into chronic data: A statistical method to better inform the radiological risk for nonhuman species. *Environ. Sci. Technol.* 54(19) (2020) 12376.
28. K. Beaugelin-Seiller, C. Della-Vedova, J. Garnier-Laplace. Is non-human species radiosensitivity in the lab a good indicator of that in the field? Making the comparison more robust. *J. Environ. Radioact.* 211 (2020) 105870.
29. A.A. Yavnyuk et al. Fluctuating asymmetry of zebra mussel (*Dreissena polymorpha* Pall.) and floating pondweed (*Potamogeton natans* L.) in water bodies within the Chernobyl accident Exclusion Zone. *Radioprotection* 44(5) (2009) 475.
30. ERICA Assessment Tool 1.0. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterization and managerial considerations.
31. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод*. Під ред. В.Д. Романенка. НАН України. Ін-т гідробіології (Київ: ЛОГОС, 2006) 408 с. / V.D. Romanenko (Ed.). *Methods of Hydroecological Studies of Surface Waters*. National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Hydrobiology (Kyiv: LOGOS, 2006) 408 p. (Ukr)
32. Л.Д. Житенева, Т.Г. Полтавцева, О.А. Рудницкая. *Атлас нормальных и патологически измененных клеток крови рыб* (Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1989) 112 с. / L.D. Zhiteneva, T.G. Poltavtseva, O.A. Rudnitskaya. *Atlas of Normal and Pathologically Altered Blood Cells of Fishes* (Rostov-on-Don: Rostov Book Publishing, 1989) 112 p. (Rus)
33. О.Н. Давыдов, Ю.Д. Темниханов, Л.Я. Куровская. *Патология крови рыб* (Киев: ИНКОС, 2006) 206 с. / O.N. Davydov, Y.D. Temnikhanov, L.Ya. Kurovskaya. *Fish Blood Pathology* (Kyiv: INCOS, 2006) 206 p. (Rus)
34. В.В. Беляев и др. Динамика формирования дозы облучения пресноводных рыб после однократного поступления ^{90}Sr и ^{137}Cs в водоем. *Гидробиол. журн.* 50(5) (2014) 111. / V.V. Belyaev et al. Dynamics of irradiation dose formation in freshwater fish after ^{90}Sr and ^{137}Cs single entry in a reservoir. *Hydrobiol. J.* 50(5) (2014) 111. (Rus)
35. D.I. Gudkov et al. Peculiarities of radionuclide distribution in the main components of aquatic ecosystems within the Chernobyl accident exclusion zone. In: G.N. Nairne (Ed.). *Aquatic Ecosystems Research Trend* (New York: Nova Science Publishers, Inc., 2012) p. 383.
36. D.I. Gudkov et al. Radiation-induced cytogenetic and hematologic effects on aquatic biota within the Chernobyl exclusion zone. *J. Environ. Radioact.* 151 (2016) 438.
37. D.J. Weiss, K.J. Wardrop (Eds.). *Schalm's Veterinary Hematology*. 6th ed. (Oxford: Blackwell Publishing Ltd., 2010) 1232 p.
38. G. Liu et al. Modulation of neutrophil development and homeostasis. *Curr. Mol. Med.* 13 (2013) 1270.
39. N. Strydom, S.M. Rankin. Regulation of circulating neutrophil numbers under homeostasis and in disease. *J. Innate Immun.* 5(4) (2013) 304.
40. О.П. Васильев, А.И. Шерстнев. Влияние малых концентраций стронция-90 на кроветворение у рыб. Труды АтлантНИРО 21 (1969) 192. / O.P. Vasilyev, A.I. Sherstnev. Effect of low concentrations of strontium-90 on hematopoiesis in fish. *Trudy AtlantNIRO* 21 (1969) 192. (Rus)
41. М. Инграм. Гематологические основы для оценки степени лучевого поражения. Малые дозы, хроническое облучение и отдаленные эффекты. Руководство по радиационной гематологии. Совместное издание Международного агентства по атомной энергии и Всемирной организации Здравоохранения (Москва: Медицина, 1974) 221 с. / M. Ingram. Hematological principles for assessing the degree of radiation injury: Low doses, chronic exposure, and delayed effects. Manual of Radiation Hematology. Joint publication of the International Atomic Energy Agency and the World Health Organization (Moskva: Medicina; 1974) 221 p. (Rus)
42. С.А. Киллмэн. Влияние радиации на систему клеточного обновления миелоидного ряда. В кн.: *Руководство по радиационной гематологии* (Москва: Медгиз, 1974) с. 77. / S.A. Killman. Effect of radiation on the myeloid cell renewal system. In: *Manual of Radiation Hematology* (Moskva: Medgiz, 1974) p. 77. (Rus)
43. Е.А. Жербин, А.Б. Чухловин. *Радиационная гематология* (Москва: Медицина, 1989) 176 с. / E.A. Zherbin, A.B. Chukhlov. *Radiation Hematology* (Moskva: Meditsina, 1989) 176 p. (Rus)
44. И.К. Петрович. Изменение картины крови у животных в отдаленные сроки после введения в организм радиоактивных веществ. В кн.: *Влияние радиоактивного стронция на живой организм* (Москва, Медгиз, 1961) 104 с. / I.K. Petrovich. Changes in the blood picture of animals in the long-term period after the introduction of radioactive substances into the organism. In: *Influence of Radioactive Strontium on the Living Organism* (Moskva: Medgiz, 1961) 104 p. (Rus)
45. Л.Б. Пинчук, Я.И. Серкиз, Н.К. Родионова. Состояние костномозгового кроветворения у крыс. Радиационная биология. Радиоэкология 31

- (1991) 635. / L.B. Pinchuk, Ya.I. Serkiz, N.K. Rodionova. State of bone marrow hematopoiesis in rats. *Radiat. Biol. Radioecol.* 31 (1991) 635. (Rus)
46. Н.Т. Иванова *Атлас клеток крови рыб* (Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1983) 150 с. / N.T. Ivanova. *Atlas of Fish Blood Cells* (Moskva: Legkaya i Pishchevaya Promyshlennost, 1983) 150 p. (Rus)
 47. А.В. Илюхин и др. *Цитокинетика и морфология кроветворения при хроническом облучении* (Москва: Медицина, 1982) 136 с. / A.V. Ilyukhin et al. *Cytokinetics and Morphology of Hematopoiesis Under Chronic Irradiation* (Moskva: Meditsina, 1982) 136 p. (Rus)
 48. Л.Х. Гаркави, Е.Б. Квакина, М.А. Уколова. *Адаптационные реакции и резистентность организма* (Ростов-на-Дону: Ростовское книжное издательство, 1977) 224 с. / L.Kh. Garkavi, E.B. Kvakina, M.A. Ukolova. *Adaptive Reactions and Organism Resistance* (Rostov-on-Don: Rostov Book Publishing, 1977) 224 p. (Rus)
 49. А.І. Липська та ін. Патологічні та компенсаторні реакції в системі крові дрібних гризунів за хронічного опромінення у малих дозах іонізуючої радіації. *Ядерна фізика та енергетика* 25(4) (2024) 379. / A.I. Lypska et al. Pathological and compensatory reactions in the blood system of small rodents exposed to chronic low dose ionizing radiation. *Nucl. Phys. At. Energy* 25(4) (2024) 379. (Ukr)
 50. N. Riabchenko et al. Transformation of the Chernobyl NPP cooling pond: radioecological situation and its impact on the blood system of small rodents. *Int. J. Radiat. Biol.* (2025) 1.
 51. Е.П. Кронкайт, Т.Дж. Хали. Клинические аспекты острой радиационной гематологии. В кн.: *Руководство по радиационной гематологии* (Москва: Медгиз, 1974) с. 144. / E.P. Kronkait, T.J. Khali. Clinical aspects of acute radiation hematology. In: *Manual of Radiation Hematology* (Moskva: Medgiz, 1974) p. 144. (Rus)
 52. D.I. Gudkov et al. Radionuclides in components of aquatic ecosystems of the Chernobyl accident restriction zone. In: E.B. Burlakova, V.I. Naidich (Eds.) *20 Years After the Chernobyl Accident: Past, Present and Future* (New York: Nova Science Publishers, Inc., 2007) 358 p.

N. A. Pomortseva^{1,*}, D. I. Gudkov¹, N. K. Rodionova², O. Ye. Kaglyan¹

¹ *Institute of Hydrobiology, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: natapomorceva@gmail.com

CONSEQUENCES OF LONG-TERM EXPOSURE TO IONIZING RADIATION ON THE HEMATOPOIETIC SYSTEM OF FISH IN THE WATER BODIES OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

The hematological parameters of the common rudd *Scardinius erythrophthalmus*, roach *Rutilus rutilus*, perch *Perca fluviatilis* and Prussian carp *Carassius gibelio* from the most radionuclide-contaminated water bodies of the Chernobyl Exclusion Zone were analyzed. Data on changes in the absolute number and relative composition of leukocytes, as well as morphological disorders of erythrocytes in the peripheral blood of fish in the absorbed dose rate gradient of 5.1 - 84.5 $\mu\text{Gy/h}$ are presented. In control water bodies, radiation doses did not exceed 0.07 $\mu\text{Gy/h}$. At current absorbed dose rates of up to 30 - 40 $\mu\text{Gy/h}$, mostly reactive compensatory changes were registered in the blood of fish with an increase in the content of leukocytes due to the lymphocytic and granulocytic fractions. At higher doses, deterioration of the state of hematopoiesis with a decrease in the content of leukocytes and significant changes in leukograms were noted. It was established that with an increase in the absorbed dose rate, the number of morphological disorders and pathological changes in erythrocytes increases.

Keywords: Chernobyl Exclusion Zone, radionuclide contamination, fish, absorbed dose rate, *Scardinius erythrophthalmus*, *Rutilus rutilus*, *Perca fluviatilis*, *Carassius gibelio*, hematopoietic system, leukocyte formula, morphological disorders of erythrocytes.

Надійшла / Received 23.07.2025