

А. І. Липська, Н. К. Родіонова, Н. М. Рябченко*, О. О. Бурдо, В. А. Шитюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: nryabchenko@ukr.net

**ПАТОЛОГІЧНІ ТА КОМПЕНСАТОРНІ РЕАКЦІЇ В СИСТЕМІ КРОВІ ДРІБНИХ ГРИЗУНІВ
ЗА ХРОНІЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ У МАЛИХ ДОЗАХ ІОНІЗУЮЧОЇ РАДІАЦІЇ**

Досліджено зміни в системі крові дрібних гризунів, які протягом багатьох поколінь мешкають на територіях чорнобильської зони відчуження з відносно низьким рівнем радіонуклідного забруднення. Розраховані поглинені дози тварин були в діапазоні малих доз і низьких потужностей дози. Зареєстровано дуальні зміни в системі крові: як пошкоджувальні, так і реактивні, високу варіабельність гематологічних і цитогенетичних показників. Виявлені зміни можуть бути зумовлені, насамперед, кумулятивними ефектами хронічного опромінення в малих дозах.

Ключові слова: радіонукліди, хронічне опромінення, малі дози, нориця руда, чорнобильська зона відчуження, кровотворна система, цитогенетичні аномалії.

1. Вступ

В умовах широкомасштабного техногенного радіонуклідного забруднення навколишнього середовища зі збільшенням радіаційного навантаження на біосферу надзвичайно актуальною стає оцінка біологічних ефектів малих доз радіації. Особлива увага цим дослідженням приділяється в останні десятиріччя, після аварій на ЧАЕС та Фукусімі. На сучасному етапі проблема малих доз хронічного опромінення трансформується в проблему «малих потужностей» доз, потребує урахування кумулятивної дози, оцінки відносної біологічної ефективності радіонуклідного спектра, індивідуальних реакцій опроміненого організму, а також визначення ризику розвитку патологічних змін у поколіннях. Незважаючи на значний масив експериментальних даних, отриманих у дослідженнях наслідків аварійних ситуацій, на сьогодні у науковій спільноті немає єдиної думки щодо медико-біологічних наслідків впливу хронічного опромінення зі значним внеском внутрішньої компоненти за рахунок постійного надходження радіонуклідів різної тропності. З одного боку дослідження біологічних об'єктів на забруднених територіях свідчать про негативні наслідки на різних рівнях організації біологічних систем, з іншого – про формування ознак радіоадаптації: як на індивідуальному, так і популяційному рівнях [1 - 4].

Дрібні гризуни, зокрема представники виду нориця руда *Myodes glareolus* (Schreber, 1780), є чутливими до дії іонізуючого випромінювання, широко використовуються в радіобіологічних та радіоекологічних дослідженнях, зокрема в чор-

нобильській зоні відчуження (ЧЗВ), є чутливими та інформативними біоіндикаторами. Наявні наукові дані [5], включно з власними спостереженнями, свідчать про те, що у віддалений період після аварії нориця руда є одним з найбільш розповсюджених та багаточисельних видів серед інших дрібних гризунів на території ЧЗВ, упродовж багатьох років вона є об'єктом досліджень радіаційно-індукованих порушень функціонування критичних систем організму, маркерів нестабільності геному [6, 7].

У радіобіології важливе значення надається дослідженню параметрів системи крові, оскільки вона є високочутливою до дії опромінення в широкому діапазоні доз, швидко реагує на зміну показників, від її стану залежить життєздатність організму. Дослідження патологічних і компенсаторних змін у системі крові у представників природних популяцій з радіаційно-забруднених територій важливі як з точки зору фундаментальних досліджень механізмів дії малих доз радіації, так і прикладних питань – для оцінки ризиків розвитку віддалених негативних наслідків хронічного опромінення в малих дозах. Унікальна радіоекологічна ситуація, що склалася в ЧЗВ, дає змогу провести оцінку радіаційного хронічного впливу на кровотворну систему не в модельних експериментах, а в умовах реального радіонуклідного забруднення природних екосистем після аварії на ЧАЕС.

Метою роботи було оцінити реакційну здатність та наявність патологічних змін у кровотворній системі референтних видів дрібних гризунів з природних популяцій, які постійно мешкають на території ЧЗВ з низьким рівнем радіаційного забруднення.

2. Матеріали та методи

Дослідні полігони. Дослідження проводили на полігоні, що знаходиться в «умовно» чистих локаціях ЧЗВ, на відстані 25 км від 4-го зруйнованого блока, неподалік від границі зони відчуження ЧАЕС (51.159 "N 30.134"E (WGS84)). Контрольним полігоном для виліву тварин була територія ландшафтного заказника Чернечий ліс (Обухівський район Київської області) з радіаційним фоном 10 - 12 мкР/год.

На полігонах було виділено стаціонарні майданчики та розміщено пастки-живоловки системи Шермана для виліву мишоподібних гризунів. Дослідний та контрольний полігони мали схожі біотопні характеристики та кормову базу для дрібних гризунів. Видову приналежність тварин визначали за морфологічними ознаками, вік – за комплексом таких показників як маса, довжина тіла, розвиток генеративних органів та тимуса. Об'єктом досліджень були представники виду нориці рудої (*Myodes glareolus* (Schreber, 1780)), які становили до 65 % від загальної кількості вилівлених мишоподібних на обох полігонах. Дослідна група налічувала 18 тварин (середня маса тіла: $m_{\text{ср}} = 19,5 \pm 4,5$ г), контрольна група – 20 тварин ($m_{\text{ср}} = 20,3 \pm 1,7$ г). Вибірки тварин були представлені статевозрілими особинами (віком приблизно 3 - 4 міс.).

Радіометричне обстеження ділянок проводили з використанням радіометра «Прип'ять» РКС 20.3. Вимірювання проб ґрунту та тушок тварин проводили на γ -спектрометрі CANBERRA та β -спектрометрі «СЕБ-50». Обробку спектрів здійснювали за допомогою програми WINSPECRUM та модифікованої програми «Beta fit» [8].

Для розрахунку потужності поглиненої дози (ППД) та коефіцієнтів радіаційного ризику для дрібних гризунів використовували оновлену версію моделюючої системи «ERICA», версія 2.0 [9], яка знайшла широке застосування в радіоекологічних дослідженнях.

Аналіз гематологічних показників. Периферичну кров у тварин відбирали із сонної артерії під легким ефірним наркозом, кістковий мозок для підрахунку кількості мієлокаріоцитів вимивали зі стегнової кістки 3 %-ним розчином оцтової кислоти, з кісткового мозку другої стегнової кістки робили мазки-відбитки для аналізу мієлограм. Кількісні гематологічні показники (еритроцити, лейкоцити, мієлокаріоцити) визначали пробірковим методом з використанням мікроскопа та камери Горяєва. Лейкограми та мієлограми аналізували при світловій імерсійній мі-

кроскопії в мазках, пофарбованих за Паппенгеймом, підраховуючи 200 і 500 клітин у препараті відповідно [10]. Для оцінки змін у системі кровотворення розраховували гематологічні індекси: в периферичній крові – індекс адаптації (ІА = лімфоцити / сегментоядерні нейтрофіли), індекс імунореактивності (ІІР = (лімфоцити + еозинофіли) / моноцити), індекс ядерного зсуву нейтрофілів (ІЯЗ = паличкоядерні нейтрофіли / сегментоядерні) [11, 12]. Індекс маси органа розраховували згідно з [12] за формулою:

$$C = \frac{m \text{ органа}}{M \text{ тіла}} \left[\frac{\text{мг}}{\text{г}} \right].$$

Дослідження стану кісткового мозку. Оцінку проводили сумарно за пулами кровотворення залежно від ступеня зрілості клітин: бластний пул (недиференційовані бластні клітини + мієлобласти + про- та еритробласти + лімфобласти); дозріваючі клітини нейтрофільного, еозинофільного та базофільного рядів (пром'єлоцити + мієлоцити + метамієлоцити); зрілі гранулоцити (паличкоядерні + сегментоядерні); молоді клітини еритроїдного ряду (нормобласти базофільні), гемоглобінвмісні еритроїдні клітини (нормобласти поліхроматофільні + оксифільні).

Мікроядерний тест. Аналіз клітин кісткового мозку з мікроядрами здійснювали за допомогою проточної цитофлуориметрії відповідно до методики [13]. Визначали частоту поліхроматофільних еритроцитів (ПХЕ) з мікроядрами (ПХЕ з МЯ) у перерахунку на 1000 ПХЕ. Для цього клітини кісткового мозку фарбували акридиновим помаранчевим та аналізували на проточному цитофлуориметрі (Beckman Coulter EPICS XL, Центр колективного користування науковим обладнанням Інституту біохімії НАН України). Флуоресценцію ДНК- та РНК-зв'язаного акридинового помаранчевого вимірювали в зеленому (FL1) та червоному (FL4) каналах. Цитограми аналізували за допомогою програмного пакета Floreada (<https://floreada.io>).

Статистичну обробку даних здійснювали за допомогою програмного пакета Statistica 7.0. Для оцінки статистичної достовірності різниці використовували U-test. Статистично значимі відмінності були прийняті при $p \leq 0,05$. Розмах варіації показників визначали як різницю між найбільшим та найменшим значеннями ($R = x_{\text{max}} - x_{\text{min}}$).

Умови проведення експерименту з утриманням тварин та їхнього виведення з експерименту відповідали вимогам Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» [14].

3. Результати та обговорення

Радіобіологічні дослідження проводилися протягом 2020 - 2021 рр. на локаціях ЧЗВ, що відносять до найменш радіаційно забруднених «умовно» чистих (рис. 1). На сьогодні рівень радіонуклідного забруднення на території, що була обрана для облаштування дослідного полігону, можна характеризувати як найнижчий у в межах ЧЗВ. Крім моніторингу поточної радіо-екологічної ситуації, на нашу думку, важливо представити ретроспективний аналіз радіаційних умов на цій території у більш ранній період після аварії на ЧАЕС. Первинний радіонуклідний слід

на території полігону станом на 10 травня 1986 р. характеризувався щільністю забруднення ^{137}Cs у діапазоні 10 - 20 Кі/км^2 . За даними [15] на 1992 р. щільність забруднення ґрунту аварійними радіонуклідами знизилася в 2 - 4 рази та знаходилася в межах: ^{137}Cs – 2 - 5 Кі/км^2 , ^{90}Sr – 0,5 - 1,0 Кі/км^2 (див. рис. 1), потужність дози (ПД) зовнішнього γ -опромінення оцінюється як 0,03 - 0,05 мкГр/год .

Оцінено загальні ПД опромінення тварин у 1992 р. із застосуванням ERICA Integrated Approach та карт радіонуклідного забруднення ЧЗВ, розрахункова загальна доза опромінення від внутрішніх та зовнішніх джерел становила 2,88 - 24,7 мкГр/год .

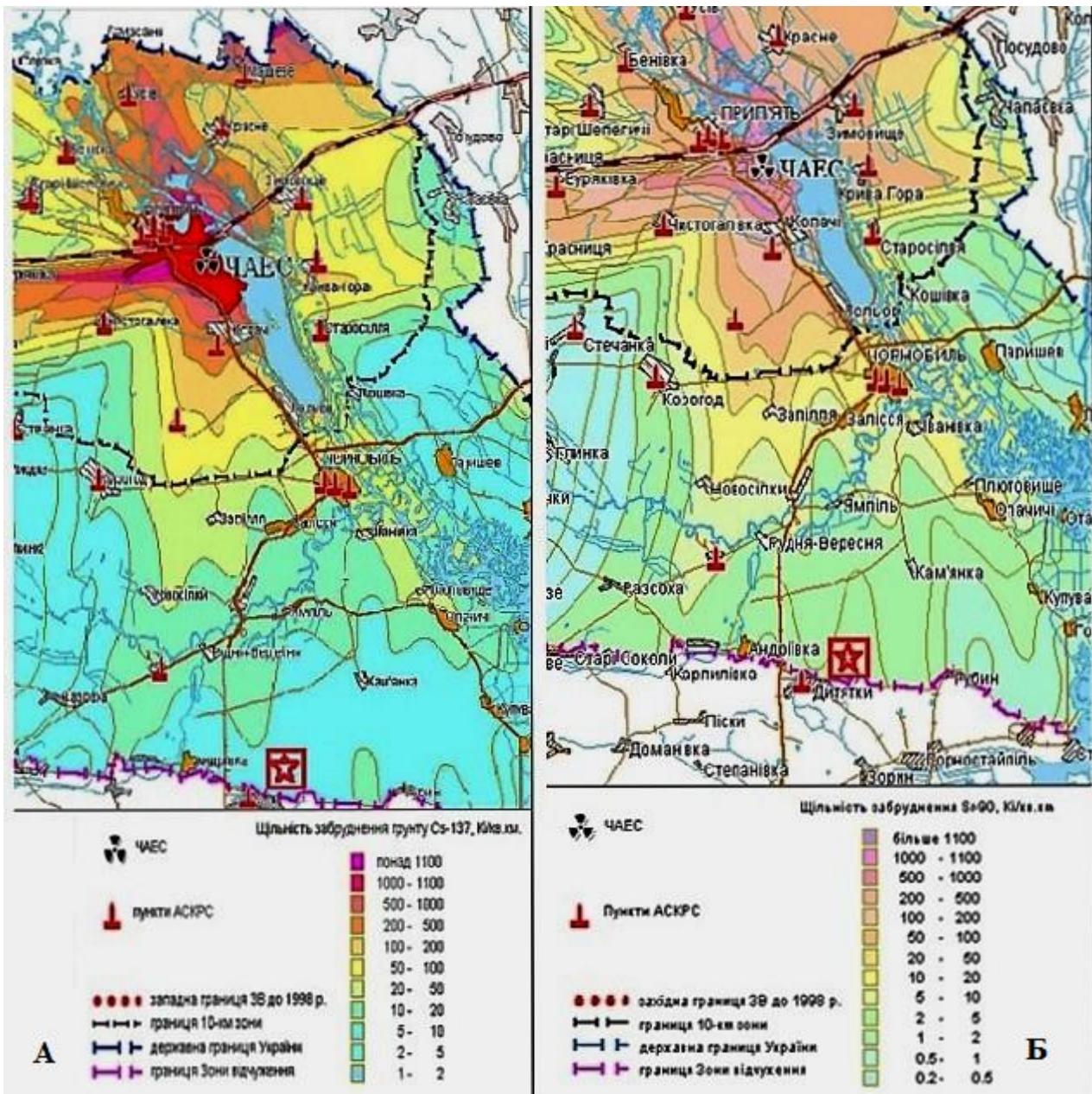


Рис. 1. Карта забруднення ЧЗВ ^{137}Cs (А) та ^{90}Sr (Б) станом на 1992 р., Кі/км^2 [15].

Зірочкою позначено схематичне розташування дослідного полігону.

(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Для подальшої оцінки радіаційних умов перебування ряду поколінь тварин у природних екосистемах, слід враховувати, що разом з природним розпадом радіонуклідів (наприклад, ^{137}Cs ~ 2,3 % на рік) поступово відбувається їхній вертикальний перерозподіл по профілю ґрунту, заглиблення радіонуклідів, що знаходилися тільки на поверхні ґрунту. У силу своїх особливостей функціонування мишоподібні гризуни перебувають у поверхневих та приповерхневих шарах ґрунту, де зосереджений основний запас радіонуклідів [16, 17], що, безумовно, впливає на формування ППД зовнішнього опромінення. Результати власних радіометричних досліджень свідчать про низькі рівні зовнішнього γ -випромінювання (ПД у межах 15 - 25 мкГр/год) на дослідній ділянці, що незначно перевищує фонові значення. Щільність радіоактивного забруднення ґрунту в місцях відлову тварин була для ^{137}Cs – 0,37 - 0,93 МБк/м², ^{90}Sr – 0,019 - 0,185 МБк/м².

Спектриметричні вимірювання тварин встановили, що питома активність інкорпорованих радіонуклідів у тушках тварин була в межах ^{137}Cs – 1,1 - 5,8 кБк/кг, ^{90}Sr – 0,4 - 1,6 кБк/кг, усереднені значення вмісту ^{137}Cs та ^{90}Sr представлено на рис. 2.

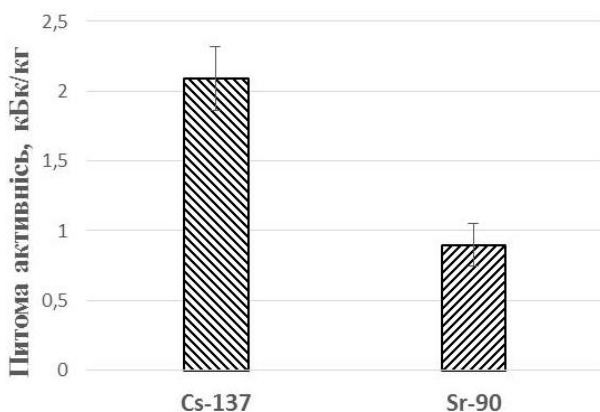


Рис. 2. Усереднені значення питомої активності радіонуклідів у тушках тварин.

Слід відзначити, що співвідношення радіонуклідів $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ у ґрунтах та тушках тварин відрізнялися: 4,8 та 2,6 відповідно. Відмінності у співвідношенні демонструють, що значна частина ^{90}Sr у природному середовищі знаходиться у біологічно доступних формах.

Оцінку ППД для нориць виконували на основі даних питомої активності основних дозоутворюючих радіонуклідів ^{90}Sr і ^{137}Cs в пробах ґрунту та тушках тварин. Дана методика передбачає розрахунок доз від інкорпорованих радіонуклідів і зовнішніх джерел опромінення. ППД формувалась в основному за рахунок інкорпорованих

радіонуклідів ^{137}Cs – 0,36 мкГр/год та ^{90}Sr – 0,55 мкГр/год, усереднена сумарна поглинена доза тварин 0,93 мкГр/год. ППД від зовнішніх джерел становила < 2 % від загальної ПД. Отже, ППД для дослідних тварин за рахунок основних дозоутворюючих радіонуклідів у перерахунку на добу становила 0,022 мГр, що дає змогу із впевненістю віднести дози опромінення до діапазону малих доз. За життя дослідні тварини могли отримати дозу в межах 1,98 - 2,64 мГр. Таким чином, у сучасних умовах фактичні дози опромінення тварин з «умовно» чистих локацій ЧЗВ не перевищують безпечний пороговий рівень радіаційного впливу для ссавців (400 мкГр/год), рекомендований МКРЗ (ICRP, 2008) [18].

На час проведення дослідження ми реєстрували ефекти за приблизними розрахунками у більше, ніж 70-го покоління нориці рудої – нащадків тварин, які отримали опромінення сукупністю радіонуклідів першого аварійного періоду, та, ймовірно, піддаються впливу дії хронічного низькоінтенсивного опромінення упродовж життя. Це дає можливість вивчати як біологічні ефекти, індуковані безпосередньою радіаційною дією, так і набуті внаслідок трансгенераційних ефектів радіації.

Для інтегральної оцінки стану системи крові нориць було проведено аналіз як морфологічних показників периферичної крові, так і мієлограм. Гематологічні дослідження тварин з «умовно» чистої локації ЧЗВ свідчать, що навіть за дії низької ППД у системі крові реєстрували зміни ряду показників порівняно з контрольною групою. Зокрема, дані кількості еритроцитів, лейкоцитів і співвідношення їхніх окремих форм наведено на рис. 3.

За показниками периферичної крові встановлено достовірне зниження кількості еритроцитів на 30 %, лейкоцитоз (збільшення вмісту лейкоцитів на 51 %), що відбувався за рахунок лімфоцитарної ланки, при тому кількість клітин гранулоцитарного ряду, як нейтрофілів, так і еозинофілів, була зниженою. Збільшення кількості лімфоцитів відбувалося на фоні достовірного збільшення маси тимуса та тенденції до зниження маси селезінки (табл. 1).

Тобто, за показниками периферичної крові можна припустити, що в організмі тварин відбуваються зміни імунного статусу. Про наявність суттєвих змін реактивної здатності у тварин, які постійно мешкають в умовах низькодозового радіонуклідного опромінення, свідчать дані лейкоцитарних ІА та ІР, що використовуються в клінічній практиці для комплексної оцінки та прогнозу стану організму [11, 12].

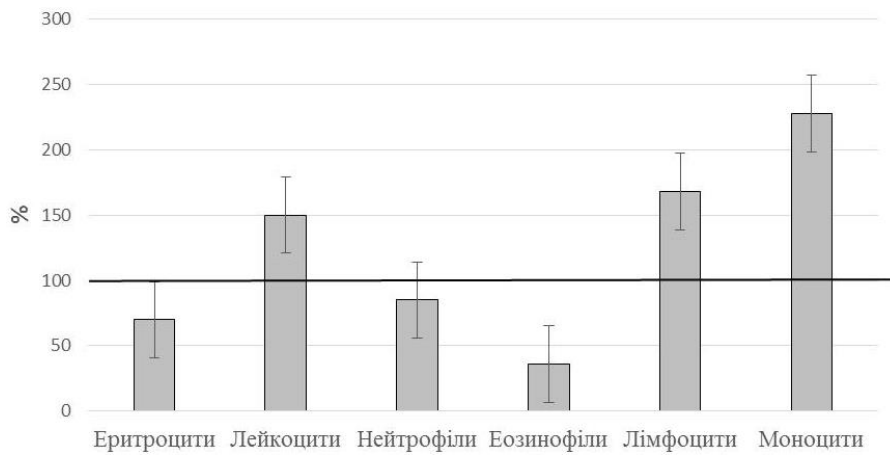


Рис. 3. Зміни абсолютної кількості клітин периферичної крові нориць рудої з полігону ЧЗВ відносно даних контрольної групи (значення контролю прийнято за 100 %).

Таблиця 1. Зміни в системі крові у нориць з полігону ЧЗВ порівняно з контролем за індексами маси кровотворних органів та лейкоцитарними індексами (ІЯЗ, ІА, ІР, ІКМ – кількість клітин кісткового мозку на грам маси тіла)

Показник	Полігон		Показник	Полігон	
	ЧЗВ	Контроль		ЧЗВ	Контроль
Індекс маси тимуса	1,19 ± 0,12*	0,68 ± 0,04	ІЯЗ	0,69 ± 0,24*	0,20 ± 0,02
Індекс маси селезінки	2,33 ± 0,35	3,26 ± 0,50	ІА	10,74 ± 1,59*	4,05 ± 0,67
Міелокаріоцити, 10 ⁶ /стегнова кістка ІКМ	6,42 ± 0,59*	8,33 ± 0,29	ІР	24,42 ± 2,34	38,23 ± 9,08

Примітка. * Статистично значущі відмінності відносно контролю, U-тест, $p < 0,05$.

У тварин з полігону ЧЗВ ІА в 2,5 раза перевищував дані контролю, що зумовлено збільшенням вмісту лімфоцитів. Дана реакція є типовою для стресових реакцій різного генезу, але реєстрація аналогічних ефектів у дрібних гризунів з полігонів ЧЗВ з різним рівнем радіонуклідного забруднення упродовж тривалого часу дає змогу розглядати цей ефект як підвищення адаптаційних можливостей організму тварин [19]. Разом з цим у тварин з ЧЗВ відмічено зниження величини ІР у 1,6 раза порівняно з контролем, що вказує на порушення балансу між активністю лімфо- та монокінів.

Зміни у клітинному складі периферичної крові зумовлені станом кровотворних органів, і насамперед, – кісткового мозку. Аналіз мієлограм дослідних тварин у співставленні з контролем показав, що хронічна дія малих доз іонізуючого випромінювання призводить до дисбалансу між окремими паростками кровотворення та пулами різного ступеню диференціювання (рис. 4). У опромінених тварин відмічено збільшення відсотка бластних клітин, тенденція до збільшення частки лімфоцитів, зниження вмісту клітин гранулоцитарного ряду, особливо зрілих гранулоцитів (на 18 %), які є природним депо швидкого реагування на дію негативних чинників оточуючого середовища, і, відповідно, їхній дефіцит знижує компенсаторні можливості організму.

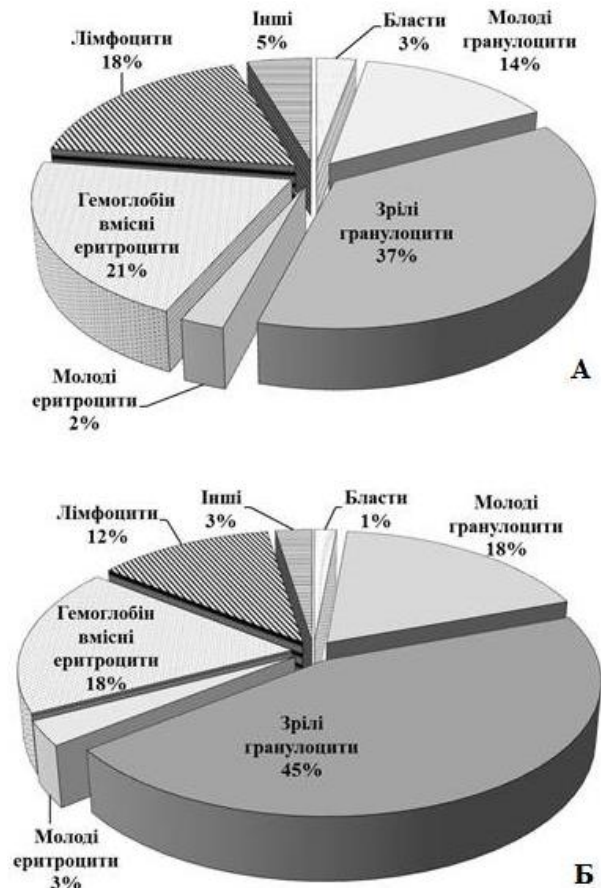


Рис. 4. Показники (%) мієлограми дослідних (А) та контрольних (Б) тварин.

Аналогічно до змін у периферичній крові і у кістковому мозку відмічено збільшення вмісту лімфоцитів, крім того встановлено зворотній зв'язок їхньої кількості з індексом маси селезінки. Це вказує на можливість поповнення даного пулу не лише завдяки проліферації у кістковому мозку, а й за рахунок переміщення лімфоцитів з периферичних органів кровотворення, що є типовим для реагування на дію стресових чинників [20]. Зміни у відсотковому розподілі клітин кісткового мозку відбувалися на фоні зниження його

загальної клітинності, проте достовірної різниці числа клітин кісткового мозку на грам маси тіла (індекс кісткового мозку) порівняно з контролем не встановлено (див. табл. 1). У кістковому мозку також зустрічались атипові (аберантні) клітини, які практично не зустрічались у контрольних тварин (рис. 5). Патологічні зміни в цих клітинах були зумовлені порушеннями саме ядерного апарату, що є більш типовим для радіаційних уражень порівняно з хімічними [21].

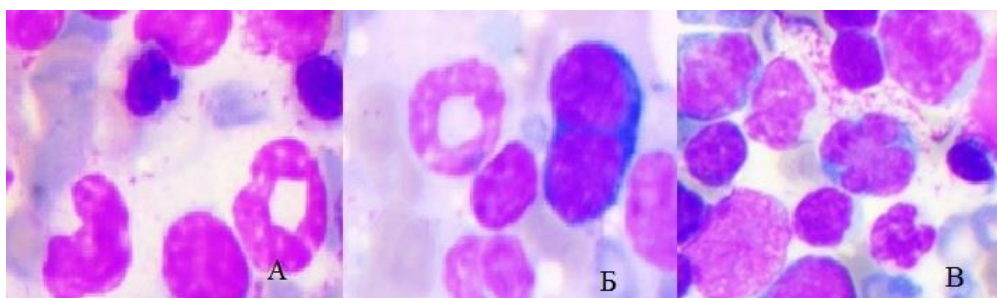


Рис. 5. Мікрофотографії кісткового мозку нориць з ЧЗВ, фарбування за Паппенгеймом, імерсійна мікроскопія, збільшення $\times 1000$: *A* – поліхроматофільний нормобласт з мікродром; *B* – двоядерний базофільний нормобласт; *B* – лопатевий лімфоцит. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Особливістю змін у системі крові у нориць основної групи була значна варіабельність індивідуальних гематологічних показників, що може вказувати на включення процесів природного відбору тварин за рівнем радіорезистентності. У групі опромінених тварин реєстрували відхилення від типового для контрольної популяції гаусового типу розподілу гематологічних показників:

появу значної кількості тварин з відносно низькими та високими значеннями. Розмах варіації для кількості лейкоцитів становив 9,8, еритроцитів – 9,1, лімфоцитів – 7,9, мієлокаріоцитів – 13. Коефіцієнт варіації (CV) окремих показників дослідних тварин змінювався від 36 до 55 %, на відміну від контролю, де CV був: 9 - 15 % (табл. 2).

Таблиця 2. CV числа клітин крові та кісткового мозку

Група	Еритроцити	Лейкоцити	Мієлокаріоцити	Лімфоцити
Контроль	8,40	10,24	5,37	12,19
Дослід	36,62	36,27	54,89	6,82

Це вказує на те, що в популяціях гризунів, мешканців радіонуклідно забруднених територій, відбуваються адаптаційно-компенсаторні процеси з виділенням груп з різною радіорезистентністю. Звертає на себе увагу той факт, що CV лімфоцитів у нориць з ЧЗВ удвічі нижче, ніж у контролі. Тобто збільшення кількості лімфоцитів у периферичній крові є однонаправленим ефектом для більшості тварин, опромінених у діапазоні малих доз низької потужності. Слід вказати, що в даному експерименті ми досліджуємо тварин *n*-ї генерації, предки яких отримували вищі дози опромінення, але за роки після аварії на ЧАЕС популяція не набула відповідної рівноваги показників системи крові, характерної для контрольних тварин, про що свідчить поява істотної частки тварин з низькими значеннями гематологічних показників. Для прикладу нижче наведено

типів гістограми вмісту еритроцитів та мієлокаріоцитів у обстежених нориць (рис. 6).

Інформативним методом оцінки генотоксичної дії іонізуючого випромінювання є вивчення цитогенетичних ефектів у соматичних клітинах. Про підвищений рівень соматичного мутагенезу за дії малих доз радіації свідчать дані досліджень референтних видів мишоподібних, зокрема нориці рудої з територій ЧЗВ, у різні роки після аварії на ЧАЕС [22 - 24]. За результатами мікроядерного тесту середньогрупове значення спонтанної частоти ПХЕ з МЯ у тварин контрольної групи становило $3,8 \pm 0,3$, тоді як у нориць із дослідного полігону – $5,4 \pm 0,5$ на 1000 проаналізованих клітин. Проте достовірної статистичної різниці між середніми значеннями цього показника між цими групами не виявлено внаслідок істотної міжіндивідуальної варіабельності показ-

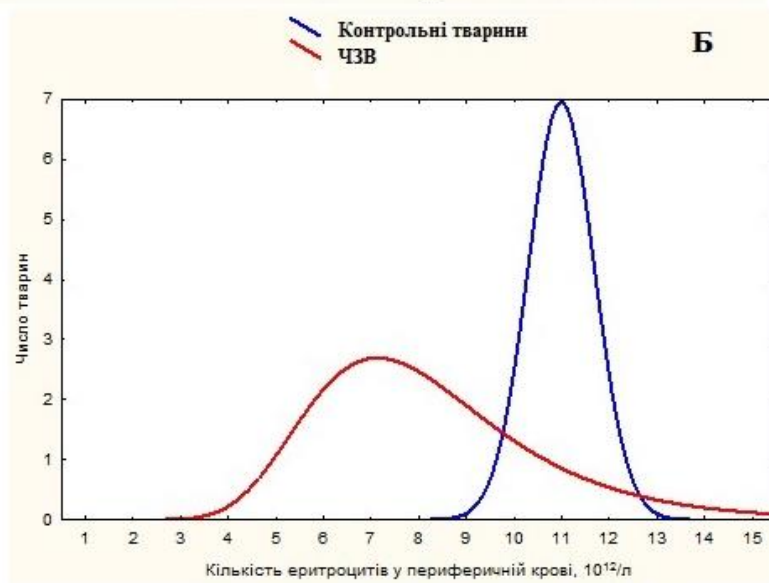
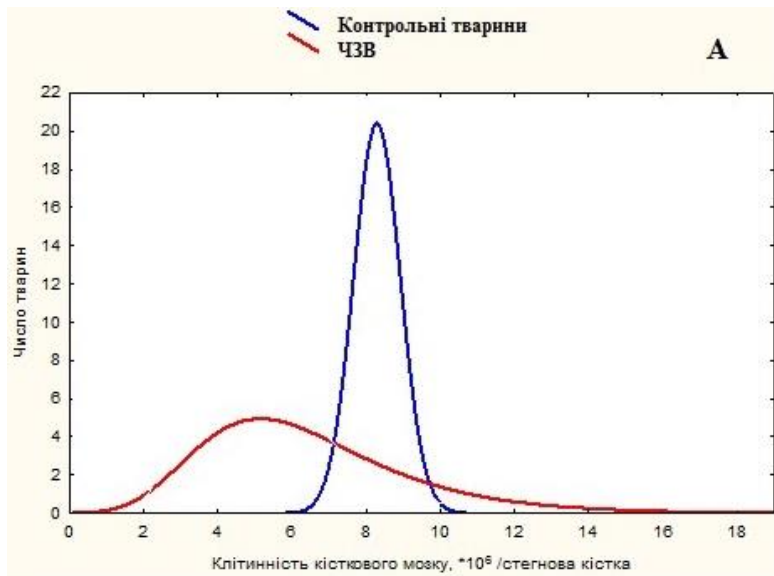


Рис. 6. Розподіл тварин за вмістом мієлокаріоцитів (А), еритроцитів (Б).
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

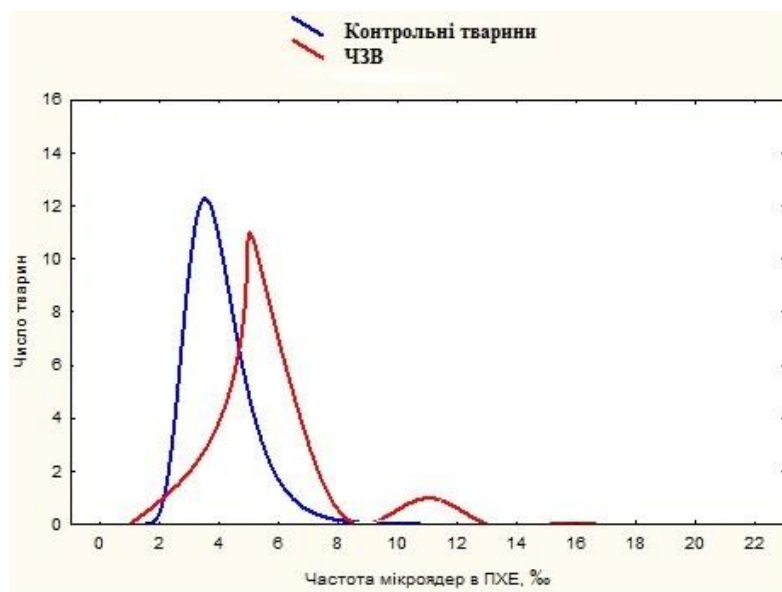


Рис. 7. Розподіл тварин за частотою ПХЕ з МЯ в кістковому мозку.
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

ника в групі тварин з дослідного полігону ЧЗВ. Індивідуальні значення частоти клітин кістково-го мозку з мікроядрами коливались у діапазоні 2,0 - 11,7 ‰ ПХЕ з МЯ; коефіцієнт варіації становив 43,1 ‰ порівняно з 15,4 ‰ у контрольній групі. Бімодальний розподіл частоти ПХЕ з МЯ демонструє неоднорідність групи тварин за показником хромосомної нестабільності, можливо існування субпопуляції з підвищеною радіочутливістю на хромосомному рівні (рис. 7). Ймовірно, під впливом хронічного іонізуючого опромінення протягом пренатального та постнатального онтогенезу в ряді поколінь тварин, відбувається формування радіаційно-індукованої нестабільності генома, що і зумовлює підвищений рівень цитогенетичних аномалій у нащадків з «умовно» чистих територій ЧЗВ.

4. Висновок

У тварин, які у ряді поколінь мешкали на радіоактивно забруднених територіях з низькою ППД, виявлено дуальні зміни у показниках сис-

теми крові як реакційного, так і пошкоджуючого характеру, високу варіабельність гематологічних та цитогенетичних показників, що свідчить про наявність у дослідній групі тварин з різною реакцією системи крові на хронічне опромінення. Це, ймовірно, зумовлено не лише опроміненням тварин у малих дозах у поколіннях, а також ефектами, індукованими радіацією у відносно високих дозах у ранній період після аварії на ЧАЕС. При цьому слід враховувати, що життєздатність природних популяцій тварин із забруднених радіонуклідами територій залежить від багатьох чинників, зокрема шляхів адаптації та мікроеволюційних процесів. Формування пристосувальних реакцій в організмі опромінених тварин потребує тривалих натурних спостережень.

Продовження експериментальних досліджень у цьому напрямку необхідне для поповнення міжнародних баз даних, що стосуються радіогенних ефектів у хронічно опромінених тварин з природних популяцій та інтеграції результатів у систему радіологічного захисту біоти.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. C. Mothersill, C. Seymour. Low dose radiation mechanisms: The certainty of uncertainty. *Mutat. Res. Genet. Toxicol. Environ. Mutagenesis* 876-877 (2022) 503451.
2. C. Mothersill et al. Factors influencing effects of low-dose radiation exposure. *Health Physics* 126 (2024) 296.
3. В.М. Войціцький та ін. Участь адаптивного потенціалу біологічних систем у формуванні їх надійності. *Екологічні науки* 1(52) Т. 2 (2024) 119. / V.M. Voitsitskiy et al. Participation of the adaptive potential of biological systems in forming their reliability. *Ekologichni Nauky* 1(52) Vol. 2 (2024) 119. (Ukr)
4. Т.Г. Глазко, Д.М. Гродзинский, В.И. Глазко. Полифакторность адаптации к хроническому низкодозовому излучению у мелких мышевидных грызунов. *Доповіді Національної академії наук України* 3 (2005) 179. / T.G. Glazko, D.M. Grodzinsky, V.I. Glazko. Polyfactoriality of adaptation to chronic low-dose radiation in small rodents. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine* 3 (2005) 179. (Rus)
5. С.П. Гащак и др. Особенности видового состава насекомоядных (Insectivora) и грызунов (Rodentia) Чернобыльской зоны отчуждения. *Вестник зоологии* 34 (2000) 51. / S.P. Gashchak et al. Species structure peculiarities of insectivores and rodents of the Chernobyl Exclusion Zone. *Vestnik Zoologii* 34 (2000) 51. (Rus)
6. B. Oskolkov et al. Radiation dose assessment for the biota of terrestrial ecosystems in the shoreline zone of the Chernobyl nuclear power plant cooling pond. *Health Phys.* 101(4) (2011) 349.
7. A. Lypska et al. Radiation-induced effects on bone marrow of bank voles inhabiting the Chernobyl exclusion zone. *International Journal of Radiation Biology* 98(8) (2022) 1366.
8. М. Желтоножская и др. Новые методические подходы к одновременному измерению активности ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в объектах окружающей среды. *Ядерная физика та енергетика* 13(4) (2012) 403. / M.V. Zheltonozhska et al. New methodological approaches to the simultaneous measurement of the ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs activity in environmental samples. *Nucl. Phys. At. Energy* 13(4) (2012) 403. (Rus)
9. J.E. Brown et al. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *J. Environ. Radioactivity* 153 (2016) 141.
10. О.С. Монастирська. *Клінічні лабораторні дослідження*. Під ред. М.Б. Шегедина (Вінниця: Нова книга, 2007) 165 с. / O.S. Monastyrskya. *Clinical Laboratory Tests*. M.B. Shehedin (ed.) (Vinnytsia: Nova Knyha, 2007) 165 p. (Ukr)
11. M.L. Turgeon. *Clinical Hematology: Theory and Procedures* (Lippincott Williams & Wilkins, 2011) 632 p.
12. H. Tvedten, R.E. Raskin. Chapter 4. Leukocyte Disorders. In: M.D. Willard, H. Tvedten (Eds.). *Small Animal Clinical Diagnosis by Laboratory Methods*. 5th ed. (W.B. Saunders, 2012) p. 63.
13. K. Criswell et al. Use of acridine orange in flow cytometric assessment of micronuclei induction. *Mutat. Res.* 414 (1998) 63.
14. Про захист тварин від жорстокого поводження. Закон України від 21. 02. 2006 №3447. Відомості Верховної ради України 27 (2006) 230. / On the

- Protection of Animals from Cruelty. Law of Ukraine of February 21, 2006, No. 3447. Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine 27 (2006) 230. (Ukr)
15. *Атлас Чорнобильської зони відчуження*. Під ред. В.М. Шестопалова (Київ: Картографія, 1996) 26 с. / *Atlas of the Chernobyl Exclusion Zone*. V.M. Shestopalov (Ed.) (Kyiv: Kartografiya, 1996) 26 p. (Ukr)
 16. V.A. Gaychenko, O.Yu. Krainiuk. Peculiarities of absorbed dose forming in some wild animals in Chernobyl exclusion zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 16(3) (2015) 287.
 17. Ю.А. Маклюк и др. Величина и структура дозовых нагрузок у мелких млекопитающих чернобыльской зоны через 19 лет после аварии. *Ядерная физика та енергетика* 3(21) (2007) 81. / Yu.A. Maklyuk et al. Values and structure of dose burdens in small mammals of the Chernobyl zone in 19 years after the accident. *Nucl. Phys. At. Energy* 3(21) (2007) 81. (Rus)
 18. ICRP Publication 108. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. *Ann. ICRP* 38(4-6) (2008) 1.
 19. Y. Iseki et al. Hematopoietic stem cells in the mouse spleen. *Blood* 11(112) (2008) 2421.
 20. О. Оберенко, В. Клименко. Показатели лейкоцитов периферической крови у лиц, работающих в 30-километровой зоне ЧАЭС, и работников химического предприятия. *Лікарська справа* (4) (1999) 10. / O. Oberenko, V. Klimenko. Peripheral blood leukocyte indices in persons working in 30-kilometer zone of Chernobyl NPP and workers of chemical enterprise. *Likarska sprava* (4) (1999) 10. (Rus)
 21. N.I. Ryabokon et al. Long-term development of the radionuclide exposure of murine rodent populations in Belarus after the Chernobyl accident. *Radiat. Environ. Biophys.* 44 (2005) 169.
 22. E. Rodgers, R.J. Baker. Frequencies of micronuclei in bank voles from zone of high radiation at Chernobyl, Ukraine. *Environmental Toxicology and Chemistry* 19 (2000) 1644.
 23. Н.М. Рябченко, О.О. Бурдо, А.І. Липська. Цитогенетичні дослідження *Myodes glareolus* з природних популяцій Чорнобильської зони відчуження у віддалений післяаварійний період. *Ядерная физика та енергетика* 23(1) (2022) 39. / N.M. Riabchenko, O.O. Burdo, A.I. Lypska. Cytogenetic studies of *Myodes glareolus* from the natural populations of the Chernobyl Exclusion Zone in the remote post-accident period. *Nucl. Phys. At. Energy* 23(1) (2022) 39. (Ukr)
 24. А.І. Липська та ін. Оцінка стану природних популяцій дрібних гризунів з трансформованих екосистем зони відчуження ЧАЕС за комплексом біологічних показників. *Ядерная физика та енергетика* 21 (2020) 328. / A.I. Lypska et al. Estimation of status of small rodents' natural populations from the transformed ecosystems of the Chernobyl Exclusion Zone. *Nucl. Phys. At. Energy* 21 (2020) 328. (Ukr)

A. I. Lypska, N. K. Rodionova, N. M. Riabchenko*, O. O. Burdo, V. A. Shytiuk

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

*Corresponding author: nryabchenko@ukr.net

PATHOLOGICAL AND COMPENSATORY REACTIONS IN THE BLOOD SYSTEM OF SMALL RODENTS EXPOSED TO CHRONIC LOW DOSE IONIZING RADIATION

Changes in the blood systems of small rodents inhabiting for many generations the Chernobyl Exclusion Zone territories with a relatively low level of radionuclide pollution were studied. Animals' calculated absorbed doses were in the low dose and dose rate ranges. Dual changes in the blood system were registered, damaging as well as reactive, and high variability of hematological and cytogenetic indicators was observed. Identified changes may be caused by the cumulative effects of chronic radiation exposure.

Keywords: radionuclides, chronic exposure, low doses, bank vole, Chernobyl Exclusion Zone, hematopoietic system, cytogenetic abnormalities.

Надійшла / Received 10.07.2024