

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ**  
**І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**

**БУРДО ОЛЕНА ОЛЕГІВНА**

УДК 575::539.1, 616.15::539.1, 57+61]:539.1.047, 574::539.1.04

**ОЦІНКА СТАНУ МИШОПОДІБНИХ ГРИЗУНІВ ІЗ ЗОНИ**  
**ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС У ВІДДАЛЕНИЙ ПІСЛЯВАРІЙНИЙ ПЕРІОД**  
**ЗА КОМПЛЕКСОМ БІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ**

03.00.01 «Радіобіологія»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата біологічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису

Роботу виконано в Інституті ядерних досліджень Національної академії наук України

**Науковий керівник** доктор біологічних наук,  
старший науковий співробітник  
**Липська Алла Іванівна,**  
Інститут ядерних досліджень НАН України,  
завідувач відділу радіобіології та радіоекології

**Офіційні опоненти:** доктор біологічних наук, професор  
**Костенко Світлана Олексіївна,**  
Національний університет біоресурсів  
і природокористування України,  
професор кафедри генетики,  
розведення та біотехнології тварин

кандидат біологічних наук, старший дослідник  
**Тукаленко Євген Валерійович,**  
Державна установа «Національний науковий  
центр радіаційної медицини Національної  
академії медичних наук України»,  
старший науковий співробітник  
лабораторії радіологічного захисту  
Інституту радіаційної гігієни і епідеміології

Захист відбудеться «14» травня 2021 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.19 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 201

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «13» квітня 2021 року

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

В. С. Морозова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідження біологічних ефектів хронічної дії внутрішнього та зовнішнього опромінення в малих дозах є однією з центральних проблем сучасної радіобіології та радіоекології. Її актуальність визначається не тільки теоретичною, але і практичною значимістю, що зумовлено наявністю значних забруднених радіонуклідами територій внаслідок радіаційних аварій та інцидентів, а також необхідністю удосконалення радіаційного захисту довкілля та людини. Території Чорнобильської та Фукусімської зон відчуження, Тоцького полігону, Східно-Уральського радіоактивного сліду, райони з підвищеною природною радіоактивністю є унікальними майданчиками для радіобіологічних досліджень у природних умовах.

З перших днів після аварії на ЧАЕС було розгорнуто широкомасштабні дослідження поведінки, моделювання та прогнозу міграції аварійних радіонуклідів у природних екосистемах (Кашпаров В. О., 1991; 2003; Іванов Ю. А., 2003, 2011), радіобіологічних ефектів у тварин та рослин (Гайченко В. А., 1996, 2001; Гродзинський Д. М., 2005; Гудков І. М., 1995, 2006, 2011, 2017), медико-біологічних наслідків ядерної аварії.

Результати післяаварійних радіобіологічних досліджень з використанням біоіндикаторних видів виявили істотні зміни гомеостазу та функціонально-структурних характеристик природних популяцій, підвищення ембріональної та постембріональної загибелі, скорочення тривалості життя, підвищення чисельності нащадків та ювенільне розмноження (Соколов В. Е., 1999), різноспрямовані відхилення функціонування систем, зокрема кровотворення, цитогенетичних аномалій тощо, які з часом мали тенденцію до зниження, але суттєво відрізнялись від контрольних рівнів (Goncharova R. I., 1995; Rodgers B. E., 2000; Ryabokon N. I., 2005; Ryabokon N. I., Smolich I. I., 2005; Костенко С. А., 2014). Проте ризик радіаційно-індукованих трансгенераційних ефектів, таких як прихована нестабільність геному, залишається високим (Nomura T., 2017).

Отже, на сьогодні немає однозначної думки стосовно реалізації віддалених наслідків низькоінтенсивного іонізуючого опромінення та механізмів формування адаптаційних реакцій у тварин, що у ряді поколінь мешкають на територіях з різним рівнем радіонуклідного забруднення. Тому виникає нагальна потреба в отриманні нових даних щодо реалізації радіаційно-індукованих ефектів тривалої дії іонізуючого випромінювання (ІВ) у природних популяціях ссавців. Необхідність проведення натурних експериментів зумовлена тим, що у природному середовищі вплив радіаційного фактора поєднується з рядом інших екзогенних чинників нерадіаційного походження, що може суттєво модифікувати радіаційно-індуковані ефекти.

Таким чином, оцінка функціонування та стійкості біологічних видів, вивчення можливостей формування адаптивних реакцій у біоти Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) на пізній фазі аварії потребує подальших радіобіологічних та радіоекологічних досліджень із застосуванням нових

методичних підходів з широким набором біологічних показників стану організму, чутливих до дії радіаційного фактору.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана відповідно до планів наукових досліджень відділу радіобіології та радіоекології Інституту ядерних досліджень НАН України у рамках планових науково-дослідницьких тем «Дослідження кінетики радіонуклідів в організмах і тканинах лабораторних тварин та ґрунті, рибах, і грибах в різних екологічних системах, забруднених в результаті аварії на Чорнобильській АЕС» (2009 р., № д/р 0110U007158), «Дослідження міграції техногенних радіонуклідів в біогеоценозах, формування процесів дозоутворення та віддалених наслідків опромінення» (2010–2014 рр., № д/р 0110U002890), «Дослідження віддалених радіоекологічних та біологічних наслідків аварійного радіонуклідного забруднення навколишнього середовища» (2015–2019 рр., № д/р 0114U004842), «Дослідження ефектів іонізуючого випромінювання в діапазоні малих доз у природних умовах та модельних експериментах (2020–2024 рр., № д/р 0119U101725), «Радіобіологічний та радіоекологічний моніторинг новоутворених біоценозів водойми-охолоджувача Чорнобильської АЕС на стадії виведення з експлуатації» за Цільовою комплексною програмою наукових досліджень НАН України «Ядерні та радіаційні технології для енергетичного сектору і суспільних потреб» (2019–2023 рр., № д/р 0113U005072).

**Мета та завдання дослідження.** Метою дисертаційного дослідження є оцінити гематологічні і цитогенетичні показники у нориці рудої (*Myodes glareolus*) з природних популяцій Чорнобильської зони відчуження у віддалений післяаварійний період.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі задачі:

– провести польові радіоекологічні дослідження, радіометричне обстеження дослідних полігонів, що знаходяться на різній відстані від аварійного блоку ЧАЕС;

– визначити рівні накопичення основних дозоутворюючих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у нориці рудої (*M. glareolus*) з територій з різним рівнем радіонуклідного забруднення ЧЗВ у віддалений післяаварійний період;

– проаналізувати динаміку цитогенетичних аномалій в клітинах кісткового мозку *M. glareolus*, що у ряді поколінь мешкали на полігоні з високим рівнем радіонуклідного забруднення;

– дослідити реакційні зміни в системі кровотворення за гематологічними та цитогенетичними показниками у *M. glareolus* з природних біотопів ЧЗВ з різним рівнем радіонуклідного забруднення;

– визначити особливості реалізації радіобіологічних ефектів у системі крові *M. glareolus* із ЧЗВ за дії радіаційного фактору та екстремальних природно-кліматичних чинників.

*Об'єкт дослідження* – стан системи кровотворення нориці рудої з природних біотопів ЧЗВ у віддалений післяаварійний період.

*Предмет дослідження* – реакційні та патологічні зміни гематологічних та цитогенетичних показників у нориці рудої за хронічного внутрішнього та зовнішнього опромінення та екстремальних природно-кліматичних умов.

**Методи дослідження.** Методи польових радіоекологічних досліджень: радіометричні  $\gamma$ -,  $\beta$ - спектрометричні для оцінки вмісту  $^{90}\text{Sr}$  і  $^{137}\text{Cs}$  в організмі тварин та об'єктах довкілля; радіометричні та дозиметричні методи для оцінки радіаційних умов на дослідних ділянках; розрахункові методи для оцінки величини та структури дозових навантажень, морфологічні, гематологічні, цитогенетичні методи та методи математичної статистики.

**Наукова новизна отриманих результатів.** Вперше проведені комплексні радіобіологічні та радіоекологічні дослідження природних популяцій біоіндикаторного виду мишоподібних гризунів *M. glareolus* з територій ЧЗВ у віддалені терміни після аварії (2008–2016 рр.). Вперше надано порівняльну характеристику радіаційно-індукованих ефектів у *M. glareolus* з природних біотопів ЧЗВ з різним рівнем радіонуклідного забруднення. Вперше надано комплексну оцінку стану кровотворної системи за гематологічними та цитогенетичними показниками.

Виявлені особливості реакційних та патологічних змін у системі кровотворення, зокрема порушення процесів проліферації, диференціювання, а також дозрівання клітин гранулоцитарного та еритроїдного пулів кровотворення; порушення співвідношення між окремими пулами кровотворення; збільшення цитогенетичних аномалій в клітинах кісткового мозку; поява екстремедулярних осередків кровотворення; компенсаторної активації специфічної ланки імунітету.

Показано високу варіабельність гематологічних та цитогенетичних показників у тварин з територій з низьким рівнем радіаційного фону та вмістом інкорпорованих радіонуклідів, що вказує на неоднорідність реагування гетерогенних природних популяцій на дію радіаційного фактору низької інтенсивності, що, в свою чергу, зумовлено різною неспецифічною резистентністю та індивідуальною радіочутливістю.

Вперше досліджено особливості реалізації радіобіологічних ефектів у *M. glareolus* із ЧЗВ за дії радіаційного фактору та екстремальних природно-кліматичних чинників. Експериментально доведено, що сумісна дія хронічного зовнішнього та внутрішнього низькоінтенсивного іонізуючого випромінювання та аномальних абіотичних чинників довкілля призводить до істотних змін гематологічних та цитогенетичних показників, зумовлених комплексною дією цих чинників, а також трансгенераційною передачею нестабільності генома у тварин, що у ряді поколінь мешкають у ЧЗВ.

Отримані нові дані суттєво розширюють уявлення щодо реалізації радіобіологічних ефектів та компенсаторно-приспосувальних реакцій у гетерогенної природної популяції тварин за хронічного зовнішнього та внутрішнього опромінення.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати комплексних радіобіологічних та радіоекологічних досліджень з використанням

біоіндикаторного виду мишоподібних гризунів з природних популяцій ЧЗВ у віддалені терміни після аварії є важливою та необхідною складовою радіоекологічного моніторингу для об'єктивної оцінки хронічної дії іонізуючої радіації на біоту.

Нові експериментальні дані можуть слугувати науковим підґрунтям для прогнозування віддалених наслідків та можливості розвитку адаптивно-приспосувальних реакцій у ссавців за умов радіонуклідного забруднення територій, розробки стратегії захисту радіаційно трансформованих екосистем.

У роботі показано, що нориця руда за комплексом гематологічних та цитогенетичних показників є одним з чутливих та перспективних видів для інтегральної біоіндикаторної характеристики техногенних впливів на екосистеми.

Результати роботи можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці фахівців з радіобіології у ВНЗ, наукових установах та організаціях, що займаються проблемами радіобіології та радіоекології, моніторинговими дослідженнями впливу іонізуючої радіації на навколишнє природне середовище, населення та персонал.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертант брав безпосередню участь у плануванні і виконанні досліджень, в аналізі та узагальненні літературних даних за темою дослідження, проведенні польових радіоекологічних досліджень, зборі біологічного матеріалу та приготуванні препаратів для гематологічних та цитогенетичних досліджень, виконанні всіх експериментальних досліджень, статистичній обробці експериментальних даних. Планування експерименту, інтерпретація отриманих результатів і формулювання висновків проведено сумісно з науковим керівником.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати та теоретичні положення дисертації апробовано на: Міжнародні конференції: «ICRR 2011. Satellite symposium» (Київ, 2011); «Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти чорнобильської катастрофи» (м. Славутич, 2011 р.); 10th Lowrad Conference (Київ, 2011 р.); 11th Lowrad Conference (Lyon, 2012); Науково-практична конференція із міжнародною участю «Радіоекологія-2013» (м. Київ, 2013 р.); COMET Workshop. «COMET – Thirty years after the Chernobyl accident what do we know about the effects of radiation on the environment?» (Черніхів, 2016); Науково-практична конференція із міжнародною участю «Радіоекологія-2017» (м. Київ, 2017 р.); «Ольвійський форум – 2018» (м. Миколаїв, 2018 р.); Fourth Annual BTRP Ukraine Regional One Health Research Symposium. (Київ, 2019); Щорічні наукові конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, 2009 р., 2010 р., 2012 р., 2014 р., 2016 р., 2017 р., 2018 р., 2019 р.).

**Публікації.** Основні наукові положення за темою дисертації опубліковано у 25 наукових працях, з яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, віднесеному у наукометричних базах даних до першого квартиля (Q1) 7 статей в інших наукових виданнях України та 13 тез наукових доповідей.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, обговорення, висновків, списку використаних джерел, і додатків. Результати досліджень викладено на 163 сторніках. Цифровий матеріал представлено в 18 таблицях, графічні дані ілюстровано 25 рисунками. Список використаних джерел містить 231 найменування, із них 81 латиною.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Розділ 1 Радіоекологічні та радіобіологічні дослідження в Чорнобильській зоні відчуження.** Описано сучасний стан радіобіологічних та радіоекологічних досліджень популяцій мишоподібних гризунів з радіонуклідно забруднених територій ЧЗВ. Представлено аналіз наявних літературних даних щодо особливостей радіаційно індукованих змін в системі кровотворення у модельних видів мишоподібних гризунів.

**Розділ 2 Об'єкти та методи дослідження.** Об'єктом досліджень були представники виду нориці рудої (*Myodes glareolus*, (Schreber, 1780)) – домінуючий вид на дослідних полігонах ЧЗВ. Тварин відловлювали в осінній період у 2008–2016 рр. Вибірки були представлені статевонезрілими особинами. В експериментах досліджено 251 тварину.

Дослідження проводили на полігонах ЧЗВ: Янів (територія Рудого лісу); Чистогалівка; Смарагдове; Чорнобиль-2; Дитятки. Контрольний полігон – територія регіонального ландшафтного парку «Міжрічинський» (радіаційний фон 10–12 мкР/год), розташований на території Чернігівської області.

**Радіометричні дослідження.** Обстеження території дослідних полігонів проводили з використанням радіометра  $\gamma$ - та  $\beta$ -випромінювання «Прип'ять». Вимірювали потужність експозиційної дози (ПЕД) та щільність потоку  $\beta$ -частинок на висоті 5 см над поверхнею ґрунту.

**Відбір зразків навколишнього середовища для досліджень.** Ґрунт в місцях відлову тварин відбирали методом конверту. Після стандартної лабораторної підготовки зразків ґрунту проводили їх  $\gamma$ - та  $\beta$ -спектрометрію, визначали ізотопний склад радіонуклідів.

**Спектрометричні методи оцінки вмісту радіонуклідів.** Вимірювання  $\gamma$ -спектрів у зразках ґрунту та тілі тварин проводили на спектрометрі Canberra-Packard (Canberra, USA, модель GX40185) з детектором із надчистого германію з МДА 0,01 Бк/зразок. Обробку спектрів проводили з використанням програми WINSPECRUM. Вміст  $^{90}\text{Sr}$  у більшості зразків визначали методом «товстих» проб без радіохімічної підготовки зразків на  $\beta$ -спектрометрі «СЕБ-50» (Україна), МДА для  $^{90}\text{Sr}$  була 0,1–0,2 Бк/зразок. Обробку спектрів проводили з використанням програм «Beta fit». (Желтоножська М. В., 2016).

**Аналіз гематологічних показників** проводили стандартним (пробірковим) методом, підрахунок кількості клітин (еритроцитів, лейкоцитів та кісткового мозку) здійснювали в камері Горяєва. Лейкоцитарну формулу визначали на 200 клітинах у мазках крові (фарбування препаратів за Паппенгеймом, світлова імерсійна мікроскопія, збільшення  $\times 1000$ ) (Монастирська О. В., 2007).

Приготування препаратів кісткового мозку тварин для цитогенетичних досліджень здійснювали згідно стандартної методики (OECD, 2016, № 475). Частоту поліхроматофільних еритроцитів (ПХЕ) з мікроядрами (МЯ) з використанням методу проточної цитофлуориметрії (Criswell K., 2003). Індекс цитотоксичності визначали за співвідношенням ПХЕ до нормохроматофільних (НХЕ). Рівні апоптичних клітин кісткового мозку визначали на цитограмах ДНК, фарбованої пропідіум йодидом, з використанням методу проточної цитофлуориметрії (Riccardi C., 2006).

Статистичну обробку даних виконували за допомогою непараметричних критеріїв та програмного пакету Statistica 7.0 (StatSoftInc., США). Статистичну достовірність відмінностей показників між групами перевіряли за допомогою тесту Манна-Вітні при  $p < 0,05$ .

Умови проведення досліджень відповідали вимогам Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» від 21.02.2006 р. № 3447-IV в редакції від 04.08.2017 р.

## РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Розділ 3 **Радіоекологічні дослідження на моніторингових полігонах ЧЗВ у віддалений післяаварійний період.** За даними радіометричного обстеження встановлено, що моніторингові полігони суттєво відрізняються за рівнем радіаційного забруднення та мають складну структуру розподілу радіаційних полів. На полігонах, розташованих в ближній зоні ЧАЕС (Янів, Чистогалівка), спостерігали виражену «плямистість» радіонуклідного забруднення, тоді як на інших - більш рівномірний розподіл дозових полів. Потужність експозиційної дози та щільність забруднення ґрунту на ділянках відлову тварин представлено в табл. 1.

Таблиця 1

### Загальна характеристика радіоактивного забруднення дослідних полігонів ЧЗВ

Полігон	Відстань від ЧАЕС, км	ПЕД $\gamma$ - випромінювання, мкР/год	Щільність забруднення ґрунту, МБк/м <sup>2</sup>	
			<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr
Янів	2,5	550–2050	3,7–20,0	0,7–2,1
Чистогалівка	3,5	310–620	1,3–8,7	0,3–1,03
Смарагдове	5	137–154	1,4–2,1	0,05–0,19
Чорнобиль-2	9	50–125	1,6–1,8	0,03–0,19
Казковий	25	20–22	0,002–0,003	0,0001–0,002
Дитятки	25	15–25	0,003–0,025	0,0008–0,0015

Досліджено вміст радіонуклідів у тілі мишоподібних гризунів з полігонів з різним рівнем радіаційного забруднення у віддалений післяаварійний період. Проведені  $\gamma$ - та  $\beta$ -спектрометричні дослідження, в тушках тварин виявили



тільки наявність радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ . Радіоактивне забруднення тварин змінювалося в широких межах:  $^{137}\text{Cs}$  – 10–3400 кБк/кг,  $^{90}\text{Sr}$  – 0,2–224 кБк/кг, окрім того, спостерігали особин з високим вмістом радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  (~17000 кБк/кг). Це, ймовірно, обумовлено низькими значеннями коефіцієнтів переходу інших радіонуклідів в трофічному ланцюзі «грунт-рослина-тварина», а також слабким їх всмоктуванням в шлунково-кишковому тракті тварин. Діапазон значень питомої активності інкорпорованих радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в тілі рудих нориць з ділянок із різним рівнем радіоактивного забруднення представлено на рис. 1.

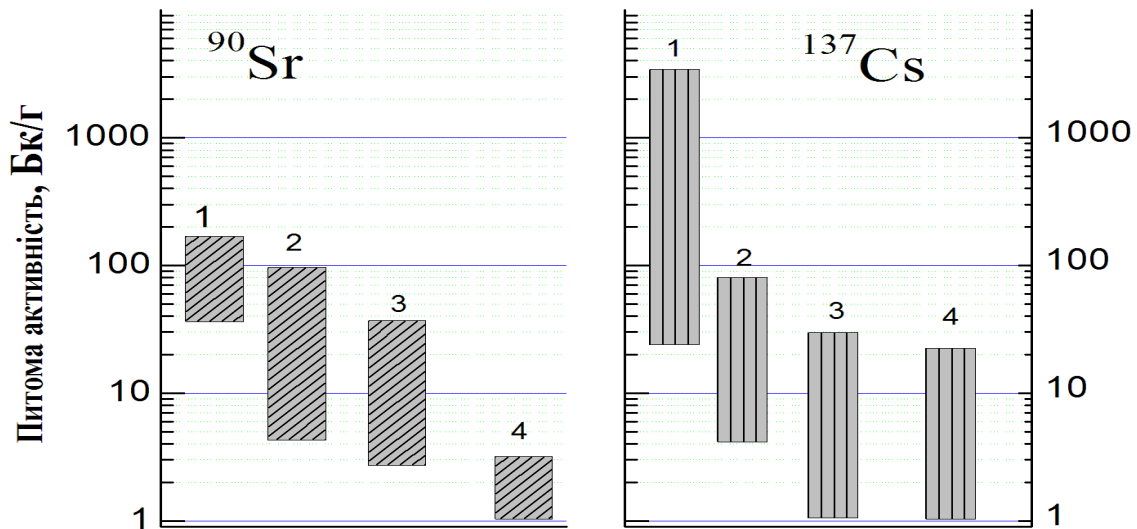


Рис. 1. Вміст інкорпорованих радіонуклідів у тілі рудих нориць з різних полігонів: 1 – Янів, 2 – Чистогалівка, 3 – Смарагдове, 4 – Казковий

Визначено вміст  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у нориці рудої; згідно середньогруповим даним рівні накопичення радіонуклідів у тварин на полігонах змінювались відповідно до радіонуклідного забруднення територій, а саме: Янів>Чистогалівка>Смарагдове>Казковий. Найвищий вміст інкорпорованих радіонуклідів  $^{90}\text{Sr}$  та  $^{137}\text{Cs}$  в тушках тварин був на полігоні Янів з високим рівнем радіонуклідного забруднення, середньогрупові значення питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у цих тварин були вищими у 4–94 раза та 1,3–52 раза, відповідно, у порівнянні з тваринами з інших полігонів.

Проведені спектрометричні дослідження виявили суттєві міжвидові відмінності в накопиченні радіонуклідів у особин нориці рудої та миші жовтогорлої (*Apodemus flavicollis*), що мешкали на одній території (рис. 2). Середні значення питомої активності інкорпорованих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у нориці рудої були в 26,4 та 6,2 раза вищими, ніж у *A. flavicollis*. Ці відмінності можуть бути пов'язані з видовими фізіологічними та морфологічними особливостями організмів, способом життя, специфікою харчування, поведінкою в природних умовах, особливостями розподілу популяції в біогеоценозі.

Проведено оцінку поглинених доз (ПД) у нориці рудої з різних дослідних полігонів ЧЗВ відповідно до (BiotaDC). Структура дозових навантажень у рудої нориці з дослідних полігонів наведено в табл. 2.

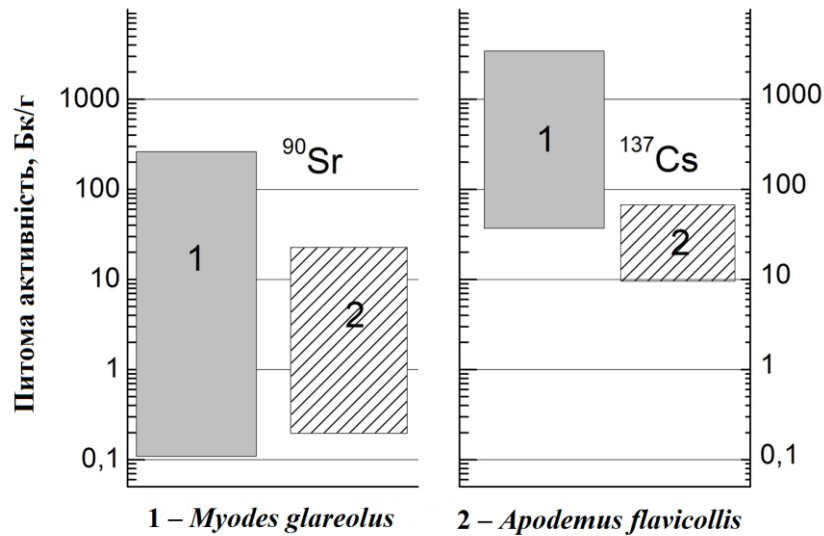


Рис. 2. Питома активність інкорпорованих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у: 1 – нориці рудої (*Myodes glareolus*); 2 – миші жовтогорлої (*Apodemus flavicollis*), що мешкали на полігоні Янів

Таблиця 2

**Величина та структура дозових навантажень у нориці рудої у 2008–2009 рр.**

Полігон	ПД за добу, мГр	Внесок виду опромінення в загальну ПД, %			
		Зовнішнє $\gamma, \beta$	Внутрішнє $^{137}\text{Cs} + ^{90}\text{Sr}$	Внутрішнє $^{137}\text{Cs}$	Внутрішнє $^{90}\text{Sr}$
Янів	5,3	10,5	89,53	46,02	43,51
Чистогоалівка	2,3	41,9	58,01	47,78	10,23
Смарагдове	0,2	37,8	62,2	47,2	15,0
Казковий	0,05	30,2	69,8	42,2	27,0

Згідно отриманих даних, найбільший внесок у формування поглиненої дози вносить внутрішнє опромінення тварин (58,01–89,53 %). На різних полігонах внесок радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у формуванні ПД був неоднаковим. У тварин з полігонів Чистогоалівка, Смарагдове, Казковий визначено високий вміст  $^{137}\text{Cs}$ , що призводить до домінуючої ролі даного радіонукліда у формуванні дози. Проте на полігоні Янів внесок  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  у загальну дозу був практично однаковим.

Повінь 2013 року на території Рудого лісу призвела до істотного затоплення полігону Янів. У 2014 р. сезонний рівень води становив 0,3 – 0,8 м над землею на великій території (приблизно 2 км<sup>2</sup>). У 2015 р. після відновлення флористичних комплексів відбулось заселення полігону мишоподібними з

прилеглих територій. В таблиці 3 представлено зміни радіаційних умов на полігоні Янів у 2012–2015 рр.

Таблиця 3

**Радіаційні умови та щільність забруднення радіонуклідами полігону Янів у 2012–2015 рр.**

Рік	ПЕД γ-випромінювання, мкЗв/год	Щільність забруднення грунту, МБк/м <sup>2</sup>		
		<sup>137</sup> Cs	<sup>90</sup> Sr	<sup>241</sup> Am
2012	6,00 – 20,00	13 – 62	2,7 – 15,6	0,5 – 1,6
2015	5,00 – 17,50	20 – 25	6 – 8	0,5 – 0,7

Згідно даним в табл. 3 у 2015 році нерівномірність забруднення ґрунту <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr значно зменшилась. Проте середні значення щільності забруднення ґрунтів радіонуклідами у 2012 та 2015 роках суттєво не відрізнялися.

Спектрометричні дослідження нориць у цей період не виявили статистично значущих відмінностей у концентрації <sup>90</sup>Sr у скелеті, які були виловлені до (2012 р.) та після затоплення (2015 р.). Проте, відмічали зменшення варіабельності вмісту інкорпорованих радіонуклідів у вибірці 2015 р. При цьому слід відмітити у них зниження вмісту <sup>137</sup>Cs у 8 разів у порівнянні з 2012 р. (рис. 3). Після майже 2-х років затоплення рослинний покрив полігону Янів істотно змінився внаслідок вторинної сукцесії. Це призвело до зміни кормової бази та вмісту радіонуклідів <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr в щоденному раціоні.

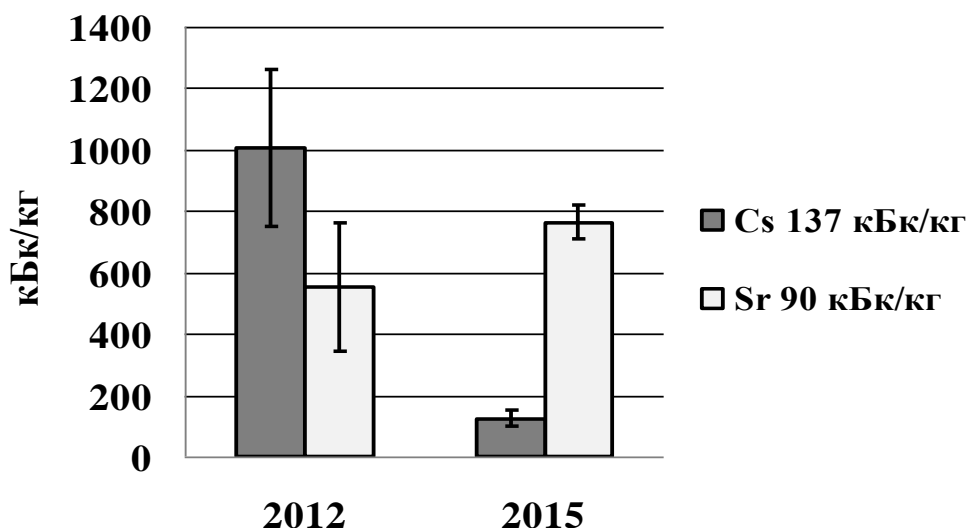


Рис 3. Зміни концентрації <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr у тілі *Myodes glareolus* з території Рудого лісу до та після затоплення (2012 та 2015 рр., відповідно)

Середня потужність дози внутрішнього опромінення нориці рудої за рахунок інкорпорованих радіонуклідів <sup>137</sup>Cs і <sup>90</sup>Sr становила 5,03 мГр/добу у 2012 р. та 3,02 мГр/добу у 2015 р.

Таким чином, у віддалений період після аварії встановлено значний внесок внутрішнього опромінення у загальну поглинену дозу, який у деяких тварин сягав 89 %. Виявлено, що вплив аномальних абіотичних чинників довкілля (тривалі повені) призводить до суттєвих змін вмісту інкорпорованих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  і  $^{90}\text{Sr}$  та їхнього вкладу у загальну радіоактивність тварин. Так, у тварин, відловлених в 2015 і 2016 рр. на полігоні Янів, після відновлення флористичних комплексів після тривалого підтоплення території відмічали збільшення вмісту  $^{90}\text{Sr}$  порівняно з  $^{137}\text{Cs}$ , що призводить до зростання його внеску у загальну поглинену дозу (до 70 %).

### Дослідження особливостей реалізації радіобіологічних ефектів у мишоподібних гризунів із природних біотопів ЧЗВ за сумісної дії радіаційного фактору та екстремальних умов оточуючого середовища

Цитогенетичні дослідження *Myodes glareolus* з природних популяцій Чорнобильської зони відчуження у віддалений післяаварійний період. Перші дослідження цитогенетичних аномалій у індикаторних видів мишоподібних гризунів з ЧЗВ були проведені нами протягом 2008–2009 років, зокрема, були обрані полігони Янів, Чистогалівка, Смарагдове, Казковий, які істотно відрізнялись між собою за щільністю забруднення радіонуклідами поверхневих шарів ґрунту (див табл. 1).

Дослідження 2012–2016 рр. проводились на полігонах, Дитятки (поблизу КПШ Дитятки), Чорнобиль-2 та Янів (територія Рудого лісу), що за радіоекологічними та еколого-фауністичними характеристиками схожі з полігонами Чистогалівка, Смарагдове, Казковий.

На рис. 4 представлено результати мікроядерного тесту в клітинах КМ нориці з дослідних полігонів, проведеного у 2008 та 2009 рр.

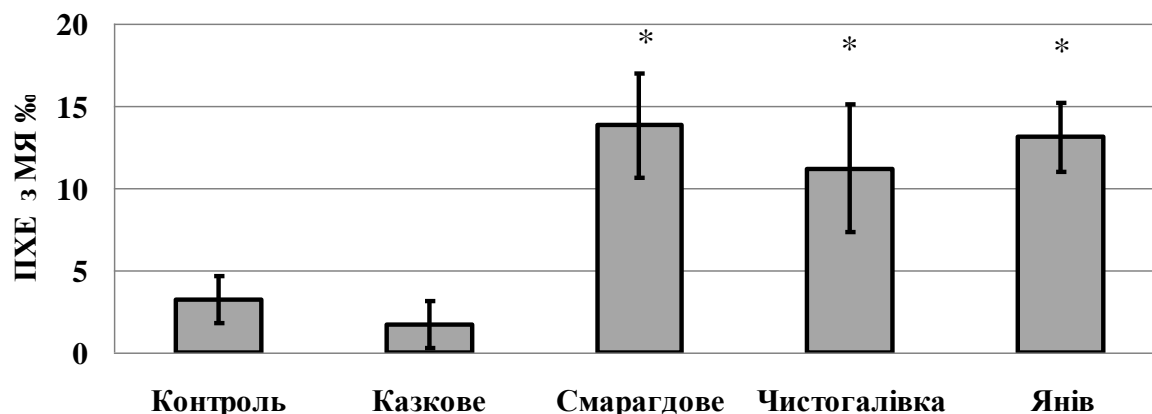


Рис. 4. Частота поліхроматофільних еритроцитів з мікроядрами у кістковому мозку нориці рудої з 30-км зони навколо ЧАЕС, відловлених у 2008–2009 роках.

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

Як видно, середньогрупова частота клітин КМ з МЯ була вірогідно вищою за контрольні значення ( $3,2 \pm 1,4$  %) у тварин як з полігону Янів

( $13,1 \pm 2,1$  ‰), що відрізнявся найвищими показниками радіонуклідного забруднення, так і з полігонів Смарагдове ( $13,8 \pm 3,2$  ‰) та Чистогалівка ( $11,2 \pm 3,9$  ‰), де рівень забруднення ґрунтів був на порядок нижчим від полігону Янів. У дослідних тварин частота клітин з МЯ варіювала у широкому діапазоні значень: Янів – 9–18 ‰; Смарагдове – 1–12 ‰; та Чистогалівка – 1–21 ‰, коефіцієнти варіації цього показника становили 18 %, 23 % та 35 %, відповідно, тобто варіабельність показника зростала зі зниженням вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у скелеті тварин. У тварин з полігону Казковий, для якого характерні найнижчі величини питомої активності  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  як у ґрунті, так і тілі тварин, частота ПХЕ з МЯ вірогідно не відрізнялась від контрольних значень.

Наші дослідження свідчать, що у віддалений період спостережень (2015–2016 рр.), разом із зменшенням дозовго навантаження у тварин з полігонів ЧЗВ із відносно «середніми» рівнями (ПЕД $_{\gamma}$  50–154 мкР/год), частота цитогенетичних аномалій мала тенденцію до зниження (рис. 4 та рис. 5).

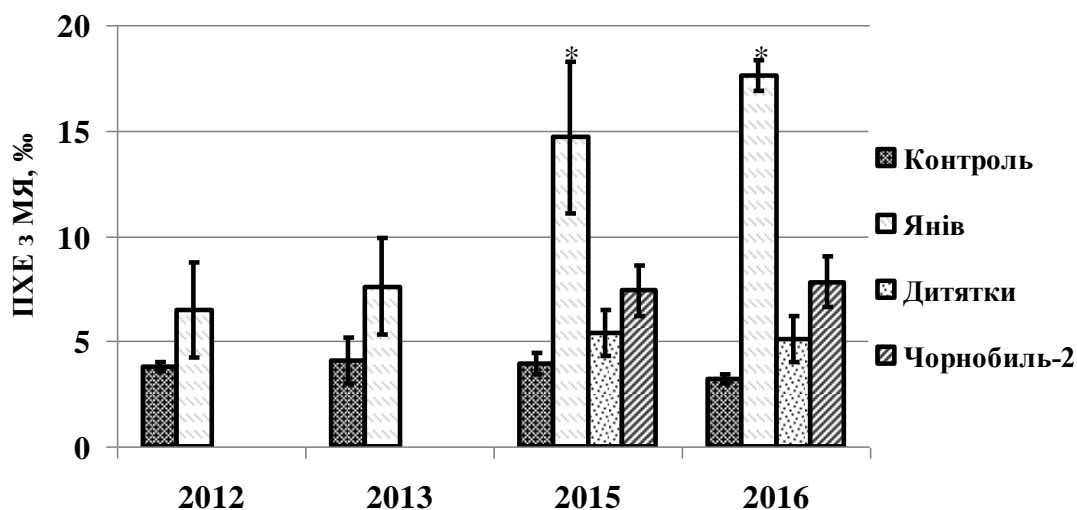


Рис. 5. Частота поліхроматофільних еритроцитів кісткового мозку з мікроядрами у нориць з дослідних полігонів ЧЗВ.

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

Індивідуальні значення ПХЕ з МЯ у тварин з полігону Дитятки з найнижчим рівнем потужності дози (15–25 мкР/год) коливались у діапазоні 1,6–13,5 ‰. У 31 % тварин частота ПХЕ з МЯ перевищувала показники контролю, коефіцієнт варіації становив 43 % у порівнянні з 15,4 % у контролі. Варіабельність цитогенетичних показників у даній групі тварин вказує на те, що за дії опромінення у діапазоні надфонових значень в більшій мірі проявляється індивідуальна чутливість організмів до дії іонізуючої радіації.

Результати цитогенетичного моніторингу та динаміки вмісту  $^{90}\text{Sr}$  у скелеті тварин з найбільш забрудненого полігону Янів протягом 2008–2016 рр. представлено на рис. 6.

Протягом 2012–2013 рр. у тварин з цього полігону відмічали тенденцію до зниження рівня цитогенетичних аномалій в клітинах КМ, тоді як з 2015 р. спостерігали підвищення частоти ПХЕ з МЯ у порівнянні з даними попередніх

років та контролем: середньо групова частота ПХЕ з МЯ складала  $14,66 \pm 3,59$  ‰ у 2015 р. та  $17,2 \pm 0,53$  ‰ у 2016 р. ( $3,9 \pm 0,4$  та  $3,2 \pm 0,3$  ‰ у контролі). При цьому, вміст  $^{90}\text{Sr}$  у скелеті тварин у 2016 був практично у 2,5 раза меншим порівняно з 2015 р. Тобто високий рівень цитогенетичних аномалій у даному випадку може бути проявом прихованої радіаційно індукованої нестабільності геному, що сформувалась у попередніх поколіннях (Гилева Э. А., 2002; Morgan W, 2011; Гончарова Р. И., 2015).

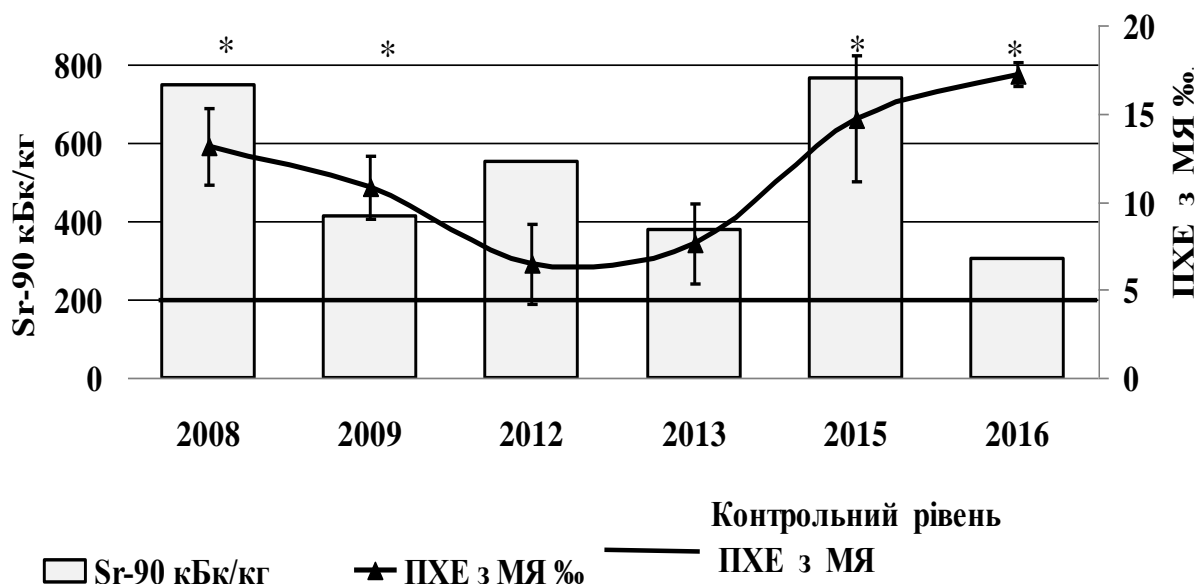


Рис. 6. Динаміка частоти поліхроматофільних еритроцитів з мікроядрами та вмісту  $^{90}\text{Sr}$  в скелеті нориці рудої з полігону Янів (2008–2016 рр.,  $n=74$ ).

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

Індекс цитотоксичності, що визначався за співвідношенням числа ПХЕ та НХЕ КМ, у тварин з середнім та високим рівнем опромінення (полігон Чорнобиль-2 –  $0,21$  мГр/доба та Янів до  $6$  мГр/доба) перевищував контрольні рівні у 2–3 рази, що є ознакою порушень процесів дозрівання та диференціювання клітин еритроїдного ряду в кістковому мозку.

Таким чином, результати цитогенетичних досліджень на території Рудого лісу протягом 2012–2013 рр. можуть свідчити про ймовірність формування у ряді поколінь опромінених тварин адаптивних ознак на хромосомному рівні соматичних клітин, які у наших дослідженнях проявлялись у тенденції до зниження рівня цитогенетичних пошкоджень клітин КМ. Проте одержані нами протягом 2015–2016 років дані цитогенетичного обстеження тварин з полігону Янів дозволяють припустити, що сумісний вплив хронічного опромінення та абіотичних стресорів довкілля (зокрема тривале затоплення ареалу проживання дослідних тварин) можуть істотно модифікувати радіаційно-індуковані біологічні ефекти та призводити до маніфестації ознак прихованої нестабільності геному у природних популяціях.

**Дослідження особливостей реалізації гематологічних та цитогенетичних ефектів у нориці рудої із природних біотопів ЧЗВ за сумісної дії радіаційного фактору та екстремальних умов оточуючого середовища**

Дослідження проводили на полігоні Янів восени 2015 року після відновлення флористичних та фауністичних комплексів, що були порушені тривалим затопленням з 2013 року.

У 2015 році у тварин реєстрували деяке зниження середньої потужності дози внутрішнього та зовнішнього опромінення. Проте, дослідження цитогенетичних показників КМ виявило достовірне підвищення частоти ПХЕ з МЯ у тварин, виловлених 2015 р. Результати мікроядерного тесту у нориць з полігону Янів до та після затоплення (2012 та 2015 рр., відповідно) представлено в табл. 4.

*Таблиця 4*

**Вміст інкорпорованих радіонуклідів та частота поліхроматофільних еритроцитів з мікроядрами (ПХЕ з МЯ) у кістковому мозку рудої нориці з полігону Янів до 2012 р. та після затоплення, 2015 р.  $M \pm m$**

	$^{137}\text{Cs}$ , Бк/г	$^{90}\text{Sr}$ , Бк/г	ПХЕ з МЯ, ‰
Контроль	-	-	4,12±1,13
2012	1006±256	554±209	6,45±3,93
2015	124±26	764±57	14,66±3,59*

Примітка. \* – статистично значущі відмінності відносно контролю, U-test,  $p < 0,05$

Разом з цитогенетичними аномаліями в КМ у тварин, виловлених після затоплення у 2015 р., спостерігалось суттєве зменшення загального числа міелокаріоцитів КМ (рис. 7.). Слід підкреслити, що в 2012 р. у дослідних нориць порівняно з контролем відмічалась тенденція до збільшення кількості міелокаріоцитів, що відбувалось на фоні активації процесів проліферації. Даний ефект, можливо, пов'язаний з формуванням адаптаційно-компенсаторних механізмів, пристосувальними реакціями системи крові до постійної дії радіаційного фактору. Після затоплення дані території були знову заселені тваринами з прилеглих територій, що мали інші радіаційні характеристики. Зміна радіаційних умов внаслідок міграції тварин призвела до розвитку у них гіпопластичного стану зі значним зниженням загальної кількості клітин кісткового мозку, та тенденцією до зниження мітотичної активності.

Крім того, у тварин, відловлених у 2015 році на полігоні Янів виявлено значні порушення в дозріванні та диференціюванні клітин еритроїдного ряду КМ, що призвело до зміни співвідношення ПХЕ/НХЕ (рис. 8.).

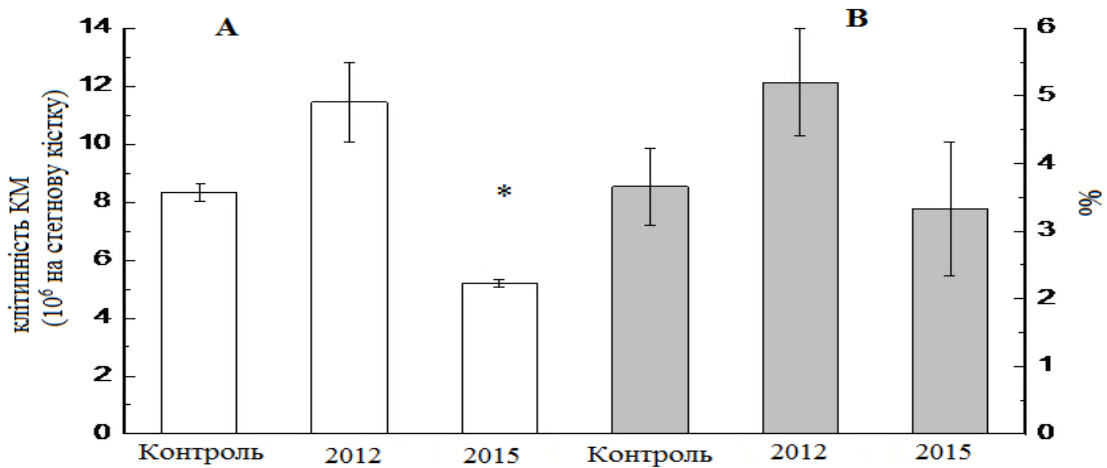


Рис. 7. Клітинність (А) та мітотичний індекс (В) кісткового мозку у дослідних норичь з полігону Янів.

Примітка.\* – статистично значущі відмінності відносно контролю, U-test,  $p < 0,05$

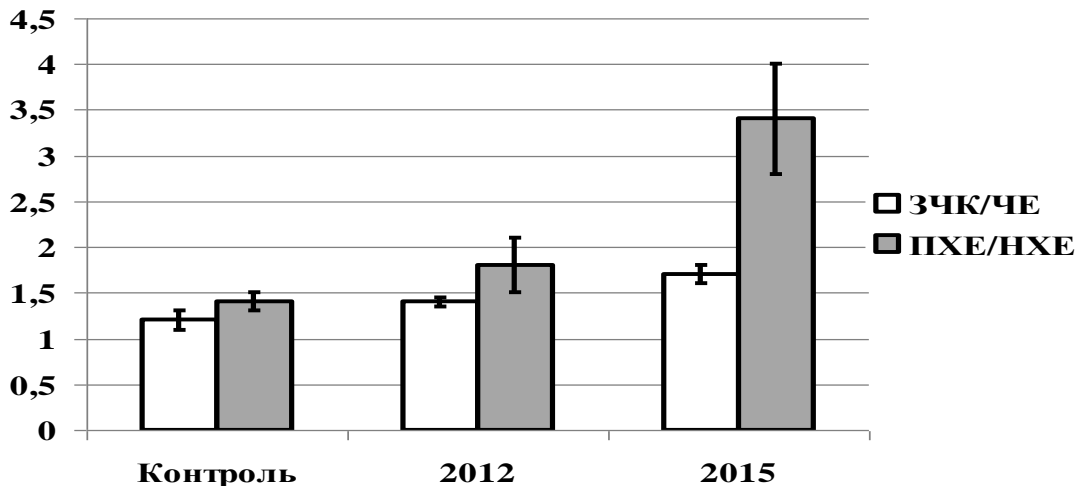


Рис. 8. Показники цитотоксичних ефектів у кістковому мозку норичь з дослідних полігонів. ЗЧК – загальне число ядерних клітин; ЧЕ – число без'ядерних еритроцитів; ПХЕ – поліхроматофільні еритроцити; НХЕ – нормохроматофільні еритроцити

Внаслідок цих порушень в КМ у периферичній крові спостерігали істотну анемію. Число еритроцитів у периферичній крові тварин 2015 р. було зменшено більш, ніж в 4,6 раза порівняно як з 2012 р., так і контролем. Про значні порушення в еритроїдній ланці кровотворення також свідчать зміни у морфології еритроцитів, а саме: анізоцитоз, поїкілоцитоз та поліхроматофілія. У тварин 2015 р. у периферичній крові відмічали тенденцію до зниження вмісту лейкоцитів, в основному за рахунок нейтрофілів. Зі сторони лімфоцитарної ланки спостерігали деякі зміни реєстрували збільшення частки лімфоцитів у лейкоцитарній формулі на фоні істотної варіабельності цього показника.



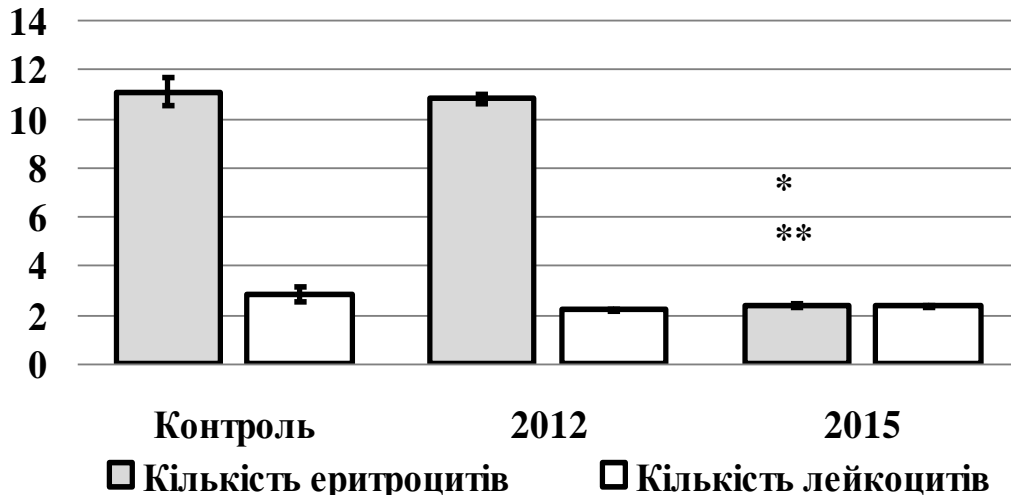


Рис. 9. Вміст еритроцитів ( $10^{12}/л$ ) та лейкоцитів ( $10^9/л$ ) у периферичній крові нориці рудої з дослідного полігону Янів до та після його затоплення (2012 та 2015 рр. відповідно).

Примітка. \* - статистично значущі відмінності відносно контролю,  $U$ -тест,  $p < 0,05$ ; \*\* - статистично значущі відмінності відносно значень показників у 2012 р.,  $U$ -тест,  $p < 0,05$

Таким чином, дослідження параметрів системи крові нориці рудої в умовах хронічного радіонуклідного забруднення та аномальних природно-кліматичних чинників виявили суттєві зміни в системі кровотворення: істотну анемію, що проявлялась у зниженні числа еритроцитів в периферичній крові, зміни у морфології еритроцитів, значне зменшення клітинності кісткового мозку. Виявлене істотне підвищення частоти цитогенетичних порушень в клітинах КМ може свідчити про маніфестацію ознак прихованої нестабільності геному у хронічно опромінених тварин природних популяцій за дії додаткових стресорів довкілля.

**Особливості змін в системі кровотворення нориці рудої з природних біотопів ЧЗВ з різним рівнем радіонуклідного забруднення.** Виконано порівняльний аналіз гематологічних показників у тварин з полігонів ЧЗВ, що суттєво відрізнялись за рівнем радіонуклідного забруднення (2016 рр.). В таблиці 5 наведено дані щодо вмісту  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  в організмі тварин дослідних полігонів з різним рівнем радіаційного забруднення.

Таблиця 5

**Вміст  $^{137}\text{Cs}$  в організмі та  $^{90}\text{Sr}$  скелеті дослідних тварин**

Полігон	Діапазон концентрацій $^{137}\text{Cs}$ , Бк/г	Діапазон концентрацій $^{90}\text{Sr}$ , Бк/г
Дитятки	1,1–1,9	0,2–0,4
Чорнобиль-2	0,8–4,0	6,5–62,5
Янів	50,0–115,0	260,0–330,0

В результаті хронічного опромінення реєстрували статистично значуще зменшення загальної кількості еритроцитів у тварин з полігону Янів на 70 % та Чорнобиль-2 на 47 % (рис. 10). Проведений порівняльний аналіз лейкоцитарної ланки периферичної крові, виявив збільшення загальної кількості лейкоцитів у тварин полігонів Дитятки (1,53 раза) та Чорнобиль-2 (1,67 раза), тоді як у тварин полігону Янів ці показники фактично не відрізнялись від даних контрольної групи (рис. 10).

При аналізі стану лімфоцитарного ланцюга кровотворення спостерігалось достовірне збільшення їх кількості в периферичній крові як за відносними (з  $68,33 \pm 8,33$  % в контролі до  $79,82 \pm 5,46$  % в досліді), так і за абсолютними (з  $1,94 \pm 0,31$  до  $3,39 \pm 1,21 \cdot 10^9/\text{л}$ ) величинами. Схожість змін в системі крові, що були виявлені у нориць з полігону Дитятки та Чорнобиль-2, полягали не тільки в односпрямованості процесів, що відбувались в еритроцитарній, лейкоцитарній, а також лімфоцитарній ланці.

Виялено, що у тварин за меншого дозового навантаження з полігонів Дитятки та Чорнобиль-2, відбуваються реактивні зміни в лімфоцитарному паростку кровотворення з формуванням екстремедулярних осередків кровотворення клітин еритроїдного та гранулоцитарних рядів у селезінці.

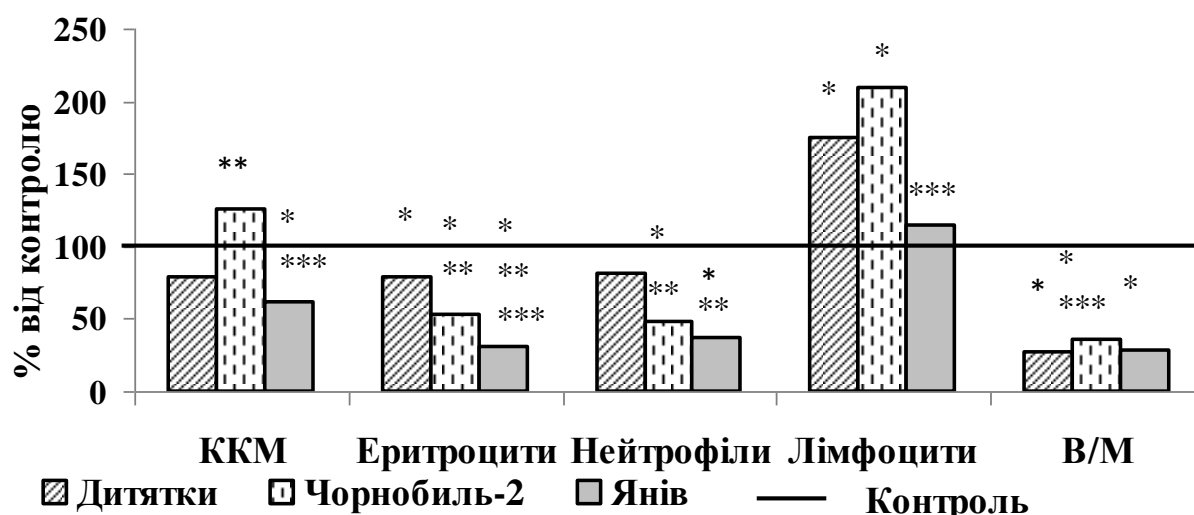


Рис. 10. Зміни гематологічних показників у нориць з дослідних полігонів ЧЗВ відносно даних контрольної групи.

Примітка. Зірочками позначено статистично значущі відмінності ( $p \leq 0,05$ ): \* – відносно контролю; \*\* – відносно полігону Дитятки ( $p \leq 0,05$ ); \*\*\* – відносно полігону Чорнобиль-2 ( $p \leq 0,05$ )

У тварин усіх полігонів реєстрували гіперплазію тимуса, що корелює зі збільшенням вмісту малих лімфоцитів у периферичній крові та опосередковано свідчить про активацію процесів дозрівання та диференціювання Т-лімфоцитів у даному органі (рис. 11).

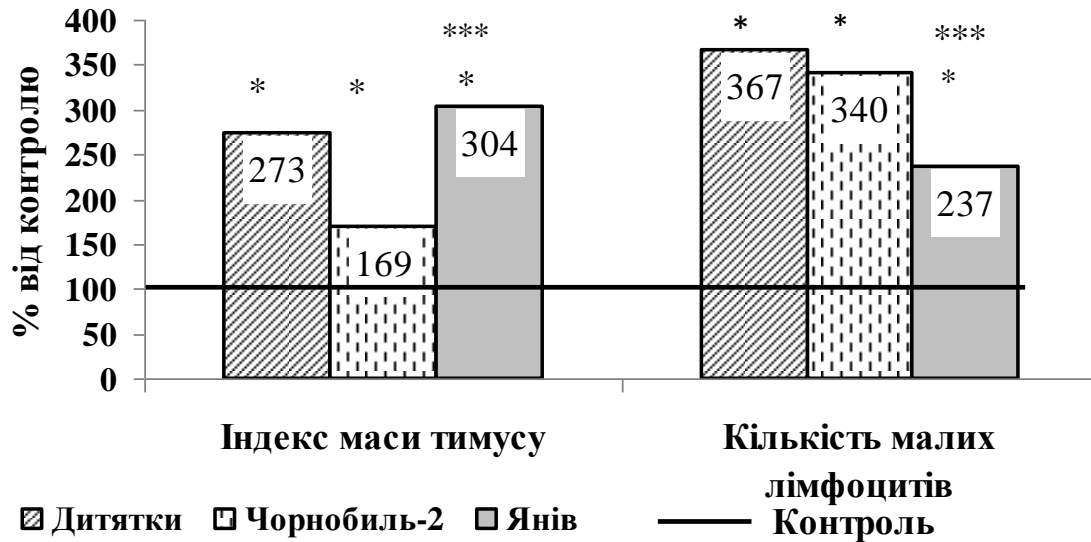


Рис. 11. Зміни індексу маси тимусу та кількості малих лімфоцитів у нориць з дослідних полігонів ЧЗВ відносно даних контрольної групи.

Примітка. Зірочками позначено статистично значущі відмінності ( $p \leq 0,05$ ): \* – відносно контролю; \*\* – відносно полігону Дитятки ( $p \leq 0,05$ ); \*\*\* – відносно полігону Чорнобиль-2 ( $p \leq 0,05$ )

Таким чином, найвиразніші зміни гематологічних показників були у тварин, що мешкали на території з високим рівнем радіаційного забруднення і відповідно отримували найбільше радіаційне навантаження у порівнянні з контролем та іншими дослідними групами. Виявлено високу варіабельність гематологічних показників у тварин, що мешкали на полігоні з низьким рівнем радіонуклідного забруднення внаслідок гетерогенності реакції природних популяцій на дію радіаційного фактору низької інтенсивності, що може бути зумовлено різною радіочутливістю тварин.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі представлено результати та узагальнення досліджень з актуального наукового напрямку – радіобіологічні ефекти хронічної дії низькоінтенсивної радіації на прикладі натурних експериментів, що були виконані на тваринах модельного виду – нориця руда з природних біотопів ЧЗВ. Вперше у віддалений період після аварії (2008–2016 рр.) оцінено стан системи кровотворення за комплексом гематологічних та цитогенетичних показників у дослідних тварин, що мешкали на територіях з різним рівнем радіонуклідного забруднення.

1. Проведено радіоекологічну характеристику 6-ти дослідних полігонів ЧЗВ, що знаходяться на різній відстані від аварійного блоку ЧАЕС. Встановлено, що щільність забруднення ґрунту радіонуклідами та потужність експозиційної дози на полігонах змінювалась у широких межах: від надфонових і близьких до даного рівня (полігони Казковий, Дитятки) до відносно середніх (ПДґ 150÷550 мкР/год на полігонах Смарагдове, Чорнобиль-2) та високих (ПДґ 550÷2050 мкР/год на полігоні Янів).

2. Визначено вміст основних дозоутворюючих радіонуклідів  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$  у нориці рудої. Протягом 2008–2016 рр. зареєстровано динамічні коливання у рівнях накопичення інкорпорованих радіонуклідів у нориці рудої, зумовлені зміною біодоступності у ланцюзі «грунт-рослина-тварина» за впливу природно-кліматичних чинників, суцесійними процесами та міграцією тварин.

3. На всіх дослідних полігонах у нориці рудої реєстрували зміни в системі кровотворення, що полягали у порушенні процесів проліферації, диференціювання, а також дозрівання клітин гранулоцитарного та еритроїдного пулів кровотворення; збільшенні цитогенетичних аномалій в клітинах кісткового мозку. Найбільш виражені патологічні зміни реєстрували у тварин, які отримували найвище дозове навантаження на полігоні Янів (до 6 мГр/доба), а саме: зниження кількості мієлокаріоцитів у 1,6 раза; еритроцитів – 3,3 раза; нейтрофілів – 2,5 раза; збільшення частоти ПХЕ з МЯ у 5,3 раза у порівнянні з контролем.

4. В умовах дії надфонових потужностей доз (20–25 мкР/год) у нориці рудої зареєстровано найвищу варіабельність гематологічних та цитогенетичних показників, що зумовлена міжіндивідуальними відмінностями у радіочутливості тварин. Встановлено відхилення від типового для контрольної популяції розподілу показників периферичної крові: появу значної кількості тварин з низькими та високими значеннями вмісту лейкоцитів (2,5 до  $7,5 \cdot 10^9/\text{л}$ ), еритроцитів ( $5,2\text{--}9,9 \cdot 10^{12}/\text{л}$ ), лімфоцитів ( $2,0\text{--}5,8 \cdot 10^9/\text{л}$ ). Коефіцієнт варіації ПХЕ з МЯ у тварин з полігону Дитятки був найвищим: 43 % проти 15 % у контрольній групі.

5. Встановлено, що у тварин при опроміненні у діапазоні доз 0,2–2 мкЗв/добу разом з деструктивними змінами у системі крові відбувались компенсаторно-відновлювальні процеси за рахунок формування екстрамедулярних осередків кровотворення у селезінці, а також гіперпластичних процесів у тимусі, що супроводжувалось збільшенням фракції лімфоцитів у периферичній крові на 75 % та 110 % у порівнянні з контролем, збільшенням маси тимуса у 2,5–3,5 раза.

6. У тварин на полігонах з потужністю дози ПД  $\gamma$  150÷550 мкР/год рівні ПХЕ з МЯ вірогідно перевищували контрольні показники на полігоні Смарагдове в 4,31 раза та Чистогалівка 3,5 раза. Цитогенетичні дослідження упродовж 2008–2013 рр. на полігоні Янів (550÷2050 мкР/год) виявили тенденцію до зниження частоти мікроядерних клітин кісткового мозку (з 13,1 до 6,45 %) на фоні відносно підвищених значень коефіцієнта міжіндивідуальної варіації цього показника (18 %), що може свідчити про формування у ряді поколінь опромінених тварин ознак радіоадаптації на хромосомному рівні соматичних клітин.

7. Вперше показано, що сумісний вплив хронічного опромінення та абіотичних стресорів довкілля (тривале затоплення біотопу) може призводити до істотної модифікації радіаційно-індукованих ефектів у системі кровотворення нориці рудої із природних популяцій ЧЗВ. Вона проявлялась у істотній анемії (зниження кількості еритроцитів у 4,8 раза та їх морфології), зменшенні кількості

міелокаріоцитів (у 1,6 раза) у порівнянні з контролем, підвищенні частоти ПХЕ з МЯ у порівнянні з даними попередніх років (у 2,4 раза) та контролю (5,3 раза). Підвищення рівнів цитогенетичних аномалій може вказувати на маніфестацію ознак прихованої нестабільності геному у ряді поколінь хронічно опромінених тварин ЧЗВ за дії додаткових стресорів довкілля.

8. Сукупність одержаних результатів свідчить, що у віддалений післяаварійний період у представників популяції нориці рудої з різних територій ЧЗВ відсутні ознаки стійкої фізіологічної та генетичної адаптації системи крові, що, ймовірно, зумовлено як трансгенераційними ефектами хронічної низькоінтенсивної радіації, так і сумісним впливом радіації та інших стресових чинників довкілля, що можуть істотно змінювати екологічні характеристики та модифікувати радіаційно-індуковані біологічні ефекти у природних популяціях дрібних ссавців.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних

1. Липская А. И., Желтоножская М. В., Николаев В. И., **Бурдо О. О.**, Кулич Н. В. Содержание техногенных радионуклидов в организме мелких грызунов Чернобыльской зоны отчуждения в отдаленный послеаварийный период. *Ядерна фізика та енергетика*. 2011. №2. С. 180–185. (Здобувачем особисто відібрано зразки ґрунтів, та нориць для проведення радіологічних досліджень, проведена статистична обробка результатів, участь у підготовці публікації).

2. **Бурдо О. О.**, Липська А. І., Ніколаєв В. І., Шитюк В. А., Кулич Н. В. Вплив радіаційних умов на цитогенетичні показники мишоподібних гризунів із зони відчуження ЧАЕС. *Ядерна фізика та енергетика*. 2013. № 1. С. 69–74. (Здобувачем особисто відірано зразки, проведено аналіз зразків, аналіз цитогенетичних препаратів, статистичну обробку результатів, підготовано частини тексту публікації).

3. Родіонова Н. К., Липська А. І., Сова О. А., **Бурдо О. О.**, Шитюк В. А., Ніколаєв В. І. Вплив радіаційних умов зони відчуження ЧАЕС на кровотворну систему нориці рудої. *Ядерна фізика та енергетика*. 2019. №1. С. 44–51. (Здобувач особисто примає участь у плануванні дослідження, проводить відлов мишоподібних гризунів, відбір ґрунтів, статистичну обробку та аналіз даних, підготовано частини тексту роботи).

4. Липська А. І., Родіонова Н. К., Рябченко Н. М., **Бурдо О. О.**, Ганжа О. Б., Вишневський Д. О., Ішніва Х. Оцінка стану природних популяцій дрібних гризунів із трансформованих екосистем Зони відчуження ЧАЕС за комплексом біологічних показників. *Ядерна фізика та енергетика*. 2020. №4. С. 328–337. (Здобувач особисто проводив відбір проб, статистичну обробку, аналіз результатів та підготовано частини тексту публікації).

### Стаття у науковому виданні іншої держави

5. **Burdo O. O.**, Lypska A. I., Riabchenko N. M., Sova O. A. Peculiarities of Hematopoiesis in small rodents from the Chernobyl Exclusion Zone on the background of extreme environment. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2020. V. 211. 105758. (Здобувачем особисто відірано проби, приготовано цитогенетичні препарати, проаналізовано цитогенетичні препарати, виконана статистична обробка, аналіз результатів та підготовано частина тексту публікації).

### Статті у інших наукових виданнях України

6. **Бурдо О. О.**, Вишневський Д. О., Мельник Т. В., Бурдо К. О., Бездробна Л. К. Мікроядерній аналіз клітин кісткового мозку нориць з 30-км зони ЧАЕС. *Бюлетень екологічного стану зони відчуження*. 2010. №1. С. 52-54. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, проводив відбір зразків, статистичну обробку результатів, аналіз препаратів, підготовку частини тексту публікації до друку).

7. **Бурдо О. О.**, Вишневский Д. А., Липская А. И. Цитогенетические эффекты в популяциях мышевидных грызунов зоны ЧАЭС. *Биологические эффекты малых доз ионизирующей радиации и радиоактивное загрязнение среды*. Материалы международной конференции. Сыктывкар. 2014. С. 22-27. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, проводив відбір зразків, аналіз препаратів, статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

8. **Бурдо О. О.**, Липська А. І., Ніколаєв В. І., Шитюк В. А., Куліч Н. В. Результати досліджень мишоподібних гризунів із зони відчуження ЧАЕС. *Радіоекологія-2013. Чорнобиль-Фукусіма. Наслідки*. Матеріали науково-практичної конференції в рамках міжнародного форуму “Довкілля України”. Київ. Житомир: Вид. ЖДУ ім. І. Франка. 2013. С. 135–137. (Здобувач особисто виконав аналіз літературних джерел, оформлення матеріалу, підготував матеріали конференції до друку).

9. **Burdo O. O.**, Lypska A. I., Sova O. A., Rodionova N. K., Nikolaev V. I., Shityuk V. A. The influence of radiation factors in Chernobyl NPP region on *Clethrionomus glareolus*. *Радиобиология: «Маяк», Чернобыль, Фукусима = Radiobiology: «Mayak», Chernobyl, Fukushima: материалы междунар. науч. конф. Гомель. 2015 г / редкол: А. Д. Наумов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : Ин-т радиологии. 2015. С. 35–38.* (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, проводив відбір зразків, статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

10. Lypska A., **Burdo O.**, Sova O., Ryabchenko N. M. Complex radiobiological investigations of small Murine mammals from the Chernobyl exclusion zone. *The scientific proceedings of the International network AgroBioNet Biodiversity after the Chernobyl Accident. Part II* Slovak University of Agriculture in Nitra 2016. P. 143-147. (Здобувач особисто примає участь у плануванні дослідження, відборі зразків, аналізі препаратів, виконав статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

11. Липська А. І., Рябченко Н. М., **Бурдо О. О.**, Сова О. А., Гриневич Ю. П., Ганжа О. Б. Особливості показників кровотворення мишоподібних гризунів з природних екосистем ЗВ ЧАЕС за хронічного радіаційного впливу на фоні експериментальних умов оточуючого середовища. *Збірник статей науково-практичної конференції із міжнародною участю «Радіоекологія-2017»*. Київ. 2017, Житомир: ЕЦ «Укрекобіокон». 2017. С. 160–164. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, відборі зразків, виконав статистичну обробку результатів, аналіз результатів, підготовку частини публікації).

12. Липська А. І., Ніколаєв В. І., **Бурдо О. О.**, Шитюк В. А. Структура та величина дозових навантажень у мишоподібних гризунів з ЗВ ЧАЕС у віддалений післяаварійний період. *Збірник статей науково-практичної конференції із міжнародною участю «Радіоекологія-2017»*. Київ. 2017 /Житомир: ЕЦ «Укрекобіокон». 2017. С. 156–160. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, відборі зразків, виконав статистичну обробку результатів, аналіз результатів)

#### Тези наукових доповідей

13. **Бурдо О. О.**, Вишне夫斯基 Д. А., Мельник Т. В., Бурдо К. О., Бездробная Л. К. Частота микроядер в клетках костного мозга мышевидных грызунов, обитающих в зоне отчуждения ЧАЭС. *Радіобіологічні та радіоекологічні аспекти чорнобильської катастрофи* Міжнародна конференція. Тези доповідей. Славутич. 2011. С. 63. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, відборі зразків, аналізі препаратів, статистичній обробці результатів, підготовці частини тексту публікації до друку).

14. **Бурдо О. О.**, Липська А. І., Мельник Т. В., Ніколаєв В. І. Генетичні ефекти у дрібних гризунів із радіаційно забруднених біотопів зони відчуження ЧАЕС. *XIX щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*. Тези доповідей. 2012. С. 131. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, провів відбір зразків, виконав статистичну обробку результатів, аналіз результатів, підготовку тексту публікації).

15. **Burdo O. O.**, Vishnevskiy D, Lypska A. I. Results of cytogenetic studies of murine rodents of the Chernobyl exclusion zone. *11<sup>th</sup> Lowrad Conference 2012 "The Effects of Low and Very Low Doses of Ionizing Radiation on Human Health and Biotores"*. Lyon. 2012. P. 35. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, аналіз препаратів, статистичну обробку результатів, підготовка тексту публікації).

16. **Бурдо О. О.**, Липская А. И., Вишне夫斯基 Д. А. Радиационно-генетические эффекты в популяциях мышевидных грызунов. *Медицинские и экологические эффекты ионизирующего излучения: материалы VI международной научно-практической конференции*, 2013. Северск-Томск / Отв. ред. Р.М. Тахауов. – Томск: ООО "РГ "Графика". 2013. С. 25. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, приготування та аналіз цитогенетичних препаратів, статистичну обробку результатів, підготовка тексту публікації).

17. **Бурдо О. О.**, Липська А. І., Сова О. А., Родіонова Н. К. Радіобіологічні ефекти у дрібних гризунів, які постійно знаходились в умовах радіоактивного забруднення зони ЧАЕС. *XXI Щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*. Київ. 2014. С. 173–174. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, статистичну обробку результатів їх аналіз).

18. **Burdo O.**, Lypska A., Sova O., Rodionova N. Radiobiological effects in small Rodents – constant inhabitants of CNPP radiation–polluted region. *Third International Conference on Radiation and Various Fields of Research*. Budva. 2015. P. 439. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, статистичну обробку результатів їх аналіз, підготовку публікації).

19. Липська А. І., Рябченко Н. М., **Бурдо О. О.**, Сова О. А., Ганжа О. Б. Оцінка стану кровотворної системи мишоподібних гризунів з природних біотопів ближньої зони відчуження ЧАЕС. *XXIII щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*. Тези доповідей. 2016. С. 178–179. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, провів відбір зразків, статистичну обробку результатів їх аналіз).

20. **Burdo O.**, Lypska A., Sova O., Ryabchenko N. Complex radiobiological investigations of small rodents from the Chernobyl Exclusion Zone. *COMET Workshop in Chernihiv Ukraine COMET - Thirty years after the Chernobyl accident what do we know about the effects of radiation on the environment?* Chernihiv. 2016. P. 26. (Здобувач особисто приймає участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, приготування та аналіз цитогенетичних препаратів, статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

21. Липська А. І., Рябченко Н. Н., **Бурдо О. О.**, Сова О. А., Гриневич Ю. П., Ганжа О. Б., Шитюк В. А., Ніколаєв В. І. Стан популяції мишоподібних гризунів в умовах радіаційного забруднення зони відчуження ЧАЕС та впливу природно-кліматичних стрес-факторів. *XXIV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*. Тези доповідей. 2017. С. 206–207. (Здобувач особисто приймав участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, аналіз препаратів, статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

22. Lypska A. I., **Burdo O. O.**, Ryabchenko N. N., Shytuk V. A., Nikolaev V. I. Dynamics of radioecological and cytogenetic changes In the populations of *Myodes glareolus* inhabiting the Chornobyl Exclusion Zone. *XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України*. Тези доповідей. 2018. С. 188–189. (Здобувач особисто приймає участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, аналіз препаратів, статистичну обробку результатів, підготовку частини тексту публікації до друку).

23. **Burdo O.**, Riabchenko N., Lypska A., Shytiuk V. Cytogenetic Characteristics of Bone Marrow of Bank Voles (*Myodes glareolus*) under Chronic Radiation Exposure. *Fourth Annual BTRP Ukraine Regional One Health Research*



*Symposium. Kyiv. 2019. P. 438. (Здобувач особисто примає участь у плануванні дослідження, відборі зразків, аналізі препаратів, статистичній обробці результатів, підготовці частини тексту публікації до друку).*

24. Родіонова Н. К., Липська А. І., Рябченко Н. М., Сова О. А., **Бурдо О. О.**, Шитюк В. А., Ніколаєв В. І. Характеристика системи крові рудої нориці в градієнті радіаційного забруднення. *XXVI щорічна наукова конференція інституту ядерних досліджень НАН України. Тези доповідей. Київ. 2019. С. 151–152. (Здобувач особисто примає участь у плануванні дослідження, відборі зразків, аналізі, статистичній обробці, аналізі результатів та підготовці частини тексту публікації).*

25. Рябченко Н. М., Липська А. І., **Бурдо О. О.** Дослідження цитогенетичних аномалій у індикаторних видів мишовидних гризунів із природних біотопів зони відчуження ЧАЕС в умовах радіонуклідного забруднення та екстремальних природно-кліматичних факторів. *XVI Міжнар. наук. конф. «Радіаційна і техногенно-екологічна безпека людини та довкілля: стан, шляхи і заходи покращення».* Миколаїв. 2020. С. 38–40. *(Здобувач особисто примає участь у плануванні дослідження, виконав відбір зразків, статистичну обробку результатів, аналіз препаратів).*

## ПОДЯКИ

На закінченні даної роботи, автор вважає своїм приємним обов'язком висловити сердечну подяку та глибоку шану науковому керівнику д.б.н. с.н.с А. І. Липській за формування напрямку наукового дослідження, допомогу, поради та підтримку на всіх етапах виконання дисертаційної роботи. Автор щиро вдячний к.б.н. с.н.с Н. М. Рябченко, к.м.н Н. К. Родіоновій за консультативну допомогу, участь в експериментах, обговоренні та інтерпретації результатів цитогенетичних та гематологічних досліджень, м.н.с. В. І. Ніколаєву та гол. інж. В. А. Шитюку за допомогу при проведенні спектрометричних вимірювань, Д. О. Вишневіському за допомогу при проведенні відлову тварин для досліджень в ЧЗВ. Всім співробітникам відділу радіобіології та радіоекології.

## АНОТАЦІЯ

**Бурдо О. О. Оцінка стану мишоподібних гризунів із зони відчуження ЧАЕС у віддалений післяаварійний період за комплексом біологічних показників.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата біологічних наук за спеціальністю 03.00.01 «Радіобіологія». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2021.

У дисертації представлено результати дослідження модельних видів мишоподібних гризунів у віддалений післяаварійний період (2008–2016 рр.) за гематологічними та цитогенетичними показниками з урахуванням радіаційного фактору.

Визначено вміст основних дозоутворюючих радіонуклідів ( $^{137}\text{Cs}$  та  $^{90}\text{Sr}$ ) в тілі тварин. У 2008–2016 рр. спостерігали динамічні зміни у рівнях накопичення радіонуклідів у нориці рудої, яке зумовлено зміною біодоступності окремих радіонуклідів в екосистемі за впливу природно-кліматичних чинників та сукцесійних процесів.

Протягом 2012–2013 рр. у тварин з полігону Янів (550–2050 мкР/год) відмічено тенденцію до зниження рівня цитогенетичних аномалій в клітинах кісткового мозку, тоді як з 2015 року спостерігалось підвищення частоти ПХЕ з МЯ у порівнянні даними попередніх років (у 2,4 раза) та контролем (5,3 раза). Що свідчить про ймовірність формування у ряді поколінь опромінених тварин ознак адаптації до хронічної дії малих доз радіації на хромосомному рівні соматичних клітин.

Дослідження стану системи крові нориць з полігонів ЧЗВ виявило радіогенні зміни: пригнічення еритроїдного та мієлоїдного рядів кровотворення (зниженням вмісту еритроцитів, та нейтрофільних та еозинофільних гранулоцитів у периферичній крові) і стимуляції лімфоїдної ланки зі збільшенням маси тимусу та кількості лімфоцитів периферичної крові.

Встановлено, що сумісний вплив хронічного опромінення та абіотичних стресорів довкілля (зокрема тривала повінь на території проживання тварин) можуть істотно модифікувати радіаційно-індуковані біологічні ефекти та призводити до маніфестації ознак прихованої нестабільності геному у природних популяціях дрібних ссавців із забруднених територій ЧЗВ.

**Ключові слова:** інкорпоровані радіонукліди, Чорнобильська зона відчуження, нориця руда, кровотворна система, цитогенетичні ефекти, хронічне опромінення, абіотичні стресори

## АННОТАЦІЯ

**Бурдо О. О. Оценка состояния мышевидных грызунов из зоны отчуждения ЧАЭС в отдаленный послеаварийный период по комплексу биологических показателей.** – Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Дисертация на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 03.00.01 «Радиобиология». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2021.

В диссертации представлены результаты исследования модельных видов мышевидных грызунов по гематологическим и цитогенетическим показателям в отдаленный послеаварийный период (2008–2016 гг.), с учетом радиационных факторов.

Определено содержание основных дозообразующих радионуклидов ( $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$ ) в теле животных. В 2008–2016 гг. наблюдали динамические изменения уровней накопления радионуклидов у полевки рыжей, что обусловлено изменением биодоступности отдельных радионуклидов в экосистеме под влиянием природно-климатических факторов и сукцесийных процессов.

В 2008–2013 гг. у животных с полигона Янов (550–2050 мкР/час) выявлена тенденция к снижению уровня цитогенетических повреждений клеток костного мозга, тогда как с 2015 г. наблюдали повышение частоты ПХЭ с МЯ в сравнении с данными предыдущих лет (2,4 раз) и контролем (5,3 раз). Это свидетельствует о вероятности формирования в ряде поколений облученных животных, признаков адаптации к хроническому действию малых доз радиации на хромосомном уровне соматических клеток.

Исследования состояния крови полевок из Чернобыльской зоны отчуждения, выявило радиогенные изменения: угнетение эритроидного и миелоидного рядов кроветворения (снижение содержания эритроцитов, нейтрофилов и эозинофилов в периферической крови) и стимуляцию лимфоидного звена с увеличением массы тимуса и увеличением количества лимфоцитов периферической крови.

Показано, что совместное влияние хронического облучения и абиотических стрессоров окружающей среды (в частности длительного затопления территории обитания животных) могут существенно модифицировать радиационно-индуцированные биологические эффекты и приводить к манифестации признаков скрытой нестабильности генома в природных популяциях мелких млекопитающих из загрязненных территорий Чернобыльской зоны отчуждения.

**Ключевые слова:** инкорпорированные радионуклиды, Чернобыльская зона отчуждения, полевка рыжая, кроветворная система, цитогенетические эффекты, хроническое облучение, абиотические стрессы.

## ANNOTATION

**Burdo O.O. The assessment of mouse-like rodents state form ChNPP exclusion zone in the remote post-accident period by a set of biological indicators.** – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Biological Sciences in specialty 03.00.01 «Radiobiology». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the research of the state of model species of murine rodents in the remote post-accident period with hematological and cytogenetic parameters in the long-term period after the Chernobyl accident, taking into account radiation factors.

A radioecological study of 6 research sites of the Chernobyl NPP (dose rate of external  $\gamma$ -irradiation, radionuclide contamination density) located at a distance of 3–25 km from the emergency unit was carried out. The content of the main dose-forming radionuclides ( $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$ ) in the body of animals was determined. During 2008–2016, dynamic changes in the levels of radionuclide accumulation in the bodies of red-backed voles were observed, showing that this has occurred due to changes in the bioavailability of individual radionuclides in the ecosystem under the influence of climatic factors and succession processes.

The study of the blood system of bank vole from the test sites in the Chernobyl exclusion zone revealed the features of radiogenic changes, manifested, on the one hand, in the suppression of erythroid and myeloid hematopoietic series with a corresponding decrease in erythrocytes and neutrophilic and eosinophilic granulocytes in peripheral blood, and on the other hand, an increase in thymus mass and the number of peripheral blood lymphocytes. It is shown that in the blood system of animals under the chronic exposure to small doses of ionizing radiation on the background of pathological and destructive changes the compensatory-restorative processes take place. As the evidence of this, the formation of extramedullary foci of hematopoiesis in the spleen, as well as hyperplastic processes in the thymus can be observed.

In the bone marrow cells (BM) of the experimental animals, a significant increase in the ratio of polychromatic and normochromatic erythrocytes (cytotoxicity index) was recorded by a factor of 2–3 times, which indicates violations of the processes of differentiation and maturation of erythroid cells, as well as the increase by 1.7–4.5 times in the level of cytogenetic abnormalities, polychromatic erythrocytes from the micronucleus in particular. A few dramatic changes in hematological and cytogenetic parameters were observed in animals living in areas with a high level of radioactive contamination (Yaniv test site) and, accordingly, received a higher radiation exposure (up to 6 mGy per day) compared to other experimental groups (0.02 and 0.21 mGy per day) and the control ones.

High variability of hematological and cytogenetic parameters was revealed in animals at the test site with a relatively low ambient radioactive contamination (Dityatki test site, AD  $\gamma$  15  $\div$  25  $\mu$ R/h). The heterogeneity of the population in the response of the blood system to the radiation factor of low intensity is probably caused by individual reactions due to different radiosensitivity and nonspecific resistance.

Studies carried out in 2008–2013 revealed a downward tendency in the levels of cytogenetic damage to the bone marrow cells of the animals from Yaniv test site with a high level of radionuclide contamination, with a slight change in radiation conditions. The obtained data indicate the probability of formation of signs of adaptation to chronic exposure to small doses of radiation at the chromosomal level of somatic cells in a number of generations of irradiated animals. However, the studies of the blood system of bank voles in the conditions of combined exposure to chronic radionuclide contamination and abnormal natural and climatic factors (long-term flooding of the habitat of experimental animals) were carried out within the Red Forest (Yaniv test site, 2015–2016) and significant changes in hematological indicators were registered, i.e anemia, changes in the morphology of erythrocytes, including anisocytosis, poikilocytosis and polychromatophilia; significant decrease ( $\sim$  40 %) in the cellularity of the bone marrow, increase in the level of pathological mitoses; as well as a significant increase of the frequency in the levels of polychromatic erythrocytes with micronuclei by 2.4 and 5.3 times compared to previous years and controls, respectively. Thus, it was found that the combined effects of chronic radiation and abiotic environmental stressors (prolonged flooding

in the animal habitat, in particular) can significantly modify radiation-induced biological effects and lead to the manifestation of signs of latent genomic instability in natural populations of small mammals in the contaminated areas of the Chernobyl exclusion zone.

The detected instability and fluctuation of critical body systems under the influence of chronic irradiation indicate a significant modifying effect of natural and climatic stressors on the formation of compensatory-conforming and adaptive processes in natural populations of murine rodents which inhabit the contaminated areas of the Chernobyl exclusion zone.

**Key words:** incorporated radionuclides, Chernobyl exclusion zone, bank vole, blood system, cytogenetic effects, chronic irradiation, abiotic stressors.

Підписано до друку 13.04.2021 року.      Формат 60x84\16  
Ум. друк. арк. 0,9                                      Обл.-вид.арк. 0,9  
Наклад 100 прим.                                      Зам. № 210235

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, тел.: 527-81-55, e-mail: nubip\_druk@ukr.net  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011



