

А. І. Липська^{1*}, Н. К. Родіонова¹, Н. М. Рябченко¹, О. О. Бурдо¹,
О. Б. Ганжа¹, Д. О. Вишневський², Х. Ішініва³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Чорнобильський радіаційно-екологічний заповідник, Чорнобиль, Україна

³ Фукусімський університет, Фукусіма, Японія

*Відповідальний автор: lypska@kinr.kiev.ua

ОЦІНКА СТАНУ ПРИРОДНИХ ПОПУЛЯЦІЙ ДРІБНИХ ГРИЗУНІВ ІЗ ТРАНСФОРМОВАНИХ ЕКОСИСТЕМ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЧАЕС ЗА КОМПЛЕКСОМ БІОЛОГІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ

Уперше досліджено морфологічні та гематологічні показники у різних видів та генерацій мишоподібних гризунів, які заселили осушені ділянки водойми-охолоджувача ЧАЕС; виконано порівняльний аналіз із даними контролю та стабільних популяцій зони відчуження ЧАЕС. Проведено радіоекологічну характеристику дослідних полігонів, визначено вміст основних дозоутворюючих радіонуклідів, оцінено дозові навантаження у тварин. У всіх дослідних групах спостерігали схожі зміни в системі кровотворення, проте в особин з осушених ділянок водойми-охолоджувача патологічні ознаки були менш вираженими. Виявлено, що в організмі за хронічної дії малих доз іонізуючої радіації разом із деструктивними процесами відбувається активація компенсаторно-відновних процесів. Показано, що впродовж життя статевозрілих тварин із збільшенням дозового навантаження виникає дисбаланс у системі кістково-мозкового кровотворення з поступовим виснаженням резервних можливостей системи крові.

Ключові слова: зона відчуження ЧАЕС, мишоподібні гризуни, радіонукліди, система крові, морфологічні індикатори, онтогенетичний підхід.

1. Вступ

Забруднення довкілля внаслідок радіаційних аварій на об'єктах атомної промисловості, зокрема сучасних катастроф на ЧАЕС та Фукусімі, суттєво впливає на формування адаптивних реакцій у біоти, функціонування та стійкості біологічних видів. Унаслідок аварії на ЧАЕС у наземні та водні екосистеми, у тому числі у водойму-охолоджувач (ВО), потрапила величезна кількість радіонуклідів у різних фізико-хімічних формах. В останні роки виконується масштабний проект виведення з експлуатації ВО з контрольованим поетапним спуском води, унаслідок чого утворилися значні суходоли (до 15 км²), сформовані переважно донними відкладеннями з високим вмістом паливних частинок. За дії природно-кліматичних умов відбувається їхня поступова деструкція, що призводить до зміни біодоступності радіонуклідів паливної матриці, активації міграції радіонуклідів у ланцюзі «грунт - рослина - тварина» [1]. Разом з тим на осушених ділянках ложа ВО відбувається інтенсивне формування нових фітоценозів та заселення цих територій представниками фауністичних угруповань дрібних ссавців за рахунок міграції з прилеглих територій та інтенсивного розмноження. Трансформація радіоактивно забрудненої водної екосистеми в наземну є унікальним явищем,

дослідження якого не має аналогів у світовій науковій практиці. Таким чином, оцінка стану новоутворених популяцій тварин з осушених територій ВО ЧАЕС є актуальною науковою задачею.

Згідно з рекомендаціями МКРЗ [2] екоцентричний підхід у сфері радіаційного захисту передбачає комплексні радіоекологічні та радіобіологічні дослідження стану довкілля та біоти з використанням референтних видів, які відіграють таку саму роль, як і «референтна людина» у медико-біологічних та епідеміологічних дослідженнях. До таких видів відносять представників природних популяцій мишоподібних гризунів (*Rodentia Muroidea*), численної та різноманітної групи наземних ссавців, які відповідають критеріям референтних організмів та добре вивчені в загальнобіологічному плані. Велика чисельність, висока репродуктивна здатність, швидка зміна генерацій надає можливість для спостережень розвитку радіаційно-індукованих змін та трансгенераційних ефектів у ряді поколінь мишоподібних. На цей час на території зони відчуження ЧАЕС зареєстровано 18 видів мишоподібних на територіях із різним рівнем радіаційного забруднення [3]. Серед них є представники родів *Apodemus* і *Myodes*, які є домінуючими видами на цих територіях, зокрема на осушених ділянках ВО ЧАЕС.

Зазвичай для оцінки стану організму широко застосовують комплекс показників системи крові, високочутливої до радіаційного чинника завдяки наявності значної кількості клітин кісткового мозку з низьким рівнем диференціювання та їхньої високої проліферативної активності, особливостям функціонування системи в цілому. Існує цілий ряд наукових публікацій щодо стану кровотворної системи у дрібних ссавців за дії різних видів та умов опромінення, зокрема радіонуклідного забруднення територій, в яких підтверджується значимість змін у системі крові для формування як ранніх, так і віддалених наслідків опромінення [4 - 8].

Метою представленої роботи було оцінити стан новоутворених популяцій мишоподібних гризунів різного репродуктивного статусу з осушених ділянок ВО ЧАЕС за показниками системи крові та комплексом морфологічних ознак з урахуванням радіаційних умов проживання та ґлинених доз.

2. Матеріали та методи

Дослідження проводили у вересні 2018 р. на двох полігонах зони відчуження ЧАЕС: полігон 1 (51°21'38.58"N 30° 8'23.50"E) – територія берегової лінії ВО до проведення гідротехнічних робіт; полігон 2 (51°22'20.60"N 30° 8'26.94"E) – осушене дно гарячої частини ВО ЧАЕС, що межує з північною частиною розподільчої дамби. На дослідних полігонах було виділено стаціонарні майданчики, де було розміщено пастки-живоловки системи Шермана. Контрольним полігоном був Міжрічнський регіональний ландшафтний парк, що знаходиться на відстані 63 км від ЧАЕС, з радіаційним фоном 10 - 12 мкР/год.

Об'єктом досліджень були мишоподібні гризуни (*Rodentia Muroidea*), представники родів *Apodemus* і *Myodes*. Контрольна група налічувала 24 тварини, серед яких 13 особин роду *Apodemus* та 11 – виду *Myodes glareolus*. Дослідні групи складались із представників роду *Apodemus* (n = 12) і виду *Myodes glareolus* (n = 27).

Видову приналежність особин визначали за морфологічними ознаками. Вік визначали за комплексом показників: маса, довжина тіла, розвиток генеративних органів та тимуса [9].

Відповідно до функціонально-онтогенетичного підходу дослідні тварини були розподілені на групи: статевозрілі (СЗ) цьогорічки (I генерація), які брали участь у розмноженні, та статево-незрілі (СН) цьогорічки (II генерація). Підрахунок кількості клітин периферичної крові, кісткового мозку, селезінки проводили в камері Горяєва. Лейкограми та міелограми аналізували при світ-

ловій імерсійній мікроскопії 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 напруженості адаптації Гаркаві (ІНА = лімфоцити/сегментоядерні нейтрофіли), індекс імунореактивності (ІПР: лімфоцити + еозинофіли/моноцити), індекс ядерного зсуву нейтрофілів (ІЯЗ = паличкоядерні нейтрофіли/сегментоядерні) [11 - 13]. Визначали індекси маси кровотворних органів (селезінки, тимуса, печінки), а також розраховували кількість клітин КМ на одиницю маси тварини.

На дослідних полігонах у місцях відлову тварин визначали потужність експозиційної дози γ -випромінювання та щільність потоку β -частинок над поверхнею ґрунту (5 см) за допомогою γ - та β -радіометра «Прип'ять» РКС 20.3. Дозу зовнішнього опромінення дослідних тварин з урахуванням добової активності окремих видів розраховували згідно з [14].

Визначали вміст ^{137}Cs та ^{90}Sr в організмі тварин за результатами γ - та β -спектрометричних вимірювань на спектрометрах Canberra (USA), модель GX40185 та «СЕБ-50». Обробку спектрів здійснювали із використанням програм WINSPECTRUM і BETAfit. Похибка γ - та β -спектрометричних вимірювань не перевищувала 3 - 5 та 10 - 20 % відповідно.

Розраховували індивідуальні потужності дози внутрішнього опромінення, що формувались за рахунок інкорпорованих радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr , з використанням програми BiotaDC (<http://biotadc.icrp.org/>).

Експериментальні дані аналізували за допомогою програм Microsoft Excel і Statistica 7.0, для оцінки статистичної достовірності різниці використовували U-test. Статистично значимі відмінності були прийняті при $p \leq 0,05$.

3. Результати досліджень

Радіоекологічні та радіобіологічні дослідження проводили як на прилеглих територіях, так і на осушених ділянках ложа ВО ЧАЕС. Обрання полігонів та об'єкта досліджень на новоутворених суходолах ґрунтувалось на попередніх екологічних дослідженнях, що включали визначення елементарних популяцій мишоподібних гризунів, які за чисельністю та щільністю заселення територій значно випереджають інші види тварин. Флористичні комплекси полігону 1 не зазнали змін унаслідок проведення гідротехнічних робіт на ВО. Потужність експозиційної дози на цій території становила 290 - 510 мкР/год, щільність потоку β -частинок над поверхнею ґрунту

була в межах 435 - 1200 см²/хв. На полігоні 2 через близьке розташування ґрунтових вод відбувається інтенсивне заростання території травами, кущами та деревами. Під час проведення радіометричних досліджень даної території встановлено значно менші значення компоненти зовнішнього опромінення порівняно з полігоном 1: потужність експозиційної дози була у 3,5 раза нижчою і становила 80 - 163 мкР/год, а щільність потоку β-частинок над поверхнею ґрунту різнилась у 5 - 6 разів і була в межах 72 - 250 см²/хв.

На дослідних полігонах реєстрували присутність мишоподібних гризунів родів *Apodemus* і *Myodes*. На полігоні 1 вони були представлені головним чином норицею рудою (*Myodes glareolus* (Schreber, 1780)), яка становила 95 % від усіх вилловлених гризунів (вид доміант), та нечисленим видом мишака жовтогорлого (*Apodemus flavicollis* (Melchior, 1834)). На полігоні 2 *Myodes glareolus* і *Apodemus agrarius* (миша польова)

були субдомінантними видами з однаковою чисельністю. Слід зазначити, що на полігоні 2 також реєстрували присутність інших видів мишоподібних (*Sorex sp.*, *Microtus minutus*), що свідчить про активну міграцію тварин та процеси сукцесії на осушених ділянках ВО.

Найвищі дози зовнішнього опромінення реєстрували у тварин з полігону 1: у рудій нориці 239 мкГр/доба, а у мишака жовтогорлого 303 мкГр/доба. Потужність дози зовнішнього опромінення тварин родів *Apodemus* і *Myodes* з полігону 2 була 71 та 59 мкГр/доба відповідно. Слід зазначити, що суттєвий внесок у дозу зовнішнього опромінення мишоподібних гризунів із дослідних полігонів ВО ЧАЕС вносить зовнішнє β-випромінювання, потужність зовнішньої дози Р_β у дрібних гризунів перевищувала в 2 - 3 рази зовнішню Р_γ.

Результати спектрометричних досліджень тварин із дослідних полігонів представлено на рис. 1.

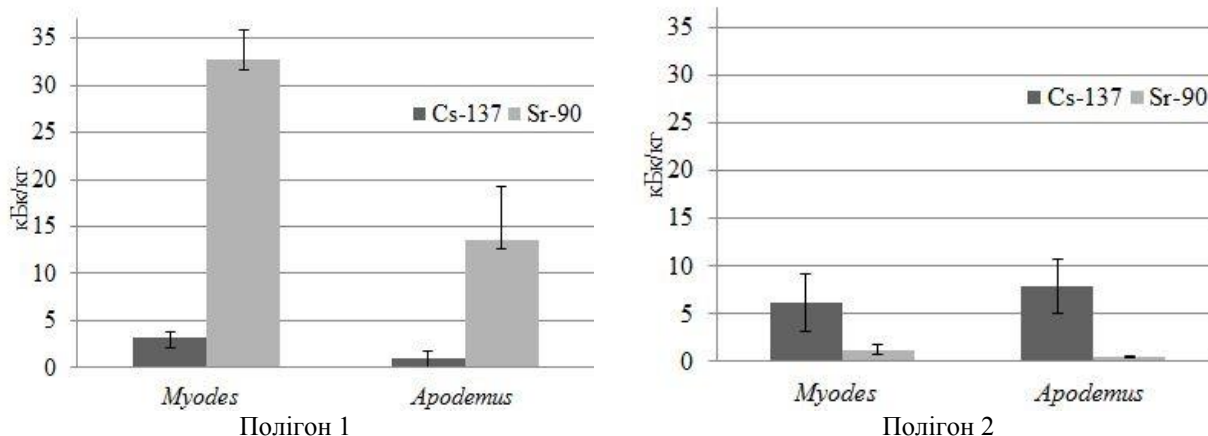


Рис. 1. Вміст ¹³⁷Cs у тілі та ⁹⁰Sr у скелеті тварин із дослідних полігонів.

Виявлено суттєві відмінності в накопиченні радіонуклідів у тварин із різних полігонів та видів. Із представлених даних видно, що у нориці рудої з полігону 1 вміст інкорпорованих радіонуклідів ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr вищий, ніж у мишака жовтогорлого. У тварин з полігону 1 середньогрупові значення питомої активності радіонуклідів у тілі нориць становили: ¹³⁷Cs – 3,12 ± 0,67, ⁹⁰Sr – 32,67 ± 3,21 кБк/кг; у мишака жовтогорлого ¹³⁷Cs – 1,04 ± 0,71, ⁹⁰Sr – 13,63 ± 6,54 кБк/кг. На полігоні 2 рівні накопичення ¹³⁷Cs у тварин були у 2 рази вищими, ніж у тварин з полігону 1, а вміст ⁹⁰Sr у скелеті був значно меншим. Дослідні тварини з полігону 2 мали такі дані питомої активності радіонуклідів: у тілі нориці рудої ¹³⁷Cs – 6,11 ± 3,01, ⁹⁰Sr – 1,26 ± 0,49 кБк/кг; у миші польової ¹³⁷Cs – 7,93 ± 2,82 та ⁹⁰Sr – 0,43 ± 0,12 кБк/кг.

Реєстрували індивідуальну варіабельність та міжвидові особливості в накопиченні радіонуклідів у тварин на території одного полігону. Варіації вмісту радіонуклідів у різних видів мишоподібних можуть бути зумовлені як змінами в активності добового раціону тварин, фізіологічними процесами виведення радіонуклідів з організму, так і видовою специфікою живлення, поведінкою у природних умовах, особливостями розподілу популяції в біогеоценозі [15].

Установлено, що основний внесок у загальну поглинену дозу тварин вносить зовнішнє опромінення: на полігоні 1 – 82 - 94 %, на полігоні 2 – 72 %. З представлених даних видно, що тварини з полігону 1 мали вищі дози опромінення (більше, ніж у 3 рази) порівняно з тваринами полігону 2.

Для ретельного аналізу одержаних даних використовували функціонально-онтогенетический підхід [16], що передбачає дослідження однакових за функціональним станом груп тварин у популяції. Статевозрілі (СЗ) цьогорічки (I генерація), тривалість життя яких становить 3 - 6 міс, виконують функцію нарощування чисельності популяції. Статевонезрілі (СН) цьогорічки (II генерація), тривалість їхнього життя становить 13 -

15 міс. За даними літератури [17], ця група тварин є більш стійкою до дії негативних чинників довкілля, вона є екологічним резервом популяції, оскільки перезимувавши, навесні ці тварини започатковують оновлення популяції.

У табл. 1 представлено дані спектрометричних досліджень та дозових навантажень у тварин різних генерацій.

Таблиця 1. Питома активність інкорпорованих радіонуклідів у тварин роду *Myodes* та *Apodemus* з полігону 1 залежно від репродуктивно-функціонального стану

| Група | ^{90}Sr | | ^{137}Cs | |
|----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | Питома активність, кБк/кг | Поглинена доза, мкГр/доба | Питома активність, кБк/кг | Поглинена доза, мкГр/доба |
| <i>Myodes</i> СЗ (I генерація) | 17,3 - 48,8 | 21,4 - 36,3 | 1,1 - 10,3 | 3,6 - 36,4 |
| <i>Myodes</i> СН (II генерація) | 18,1 - 65,5 | 22,16 - 79,1 | 1,1 - 5,2 | 3,6 - 18,8 |
| <i>Apodemus</i> СЗ (I генерація) | 13,63 - 17,2 | 16,7 - 21,2 | 1,4 - 4,8 | 3,8 - 17,2 |

Нами не виявлено достовірних відмінностей у рівнях накопичення радіонуклідів у тварин I та II генерацій, що, імовірно, зумовлено тим, що на момент досліджень процеси надходження та виведення радіонуклідів у дослідних тварин знаходились у квазірівноважному стані. Однак у СЗ тварин завдяки більш тривалому перебуванню в умовах хронічного радіаційного впливу відбувається прогресивне (упродовж усього життя) накопичення дози опромінення.

Слід зазначити, що на полігоні 2 тварини родів

Myodes та *Apodemus* були представлені в основному СН особинами. Дані вмісту інкорпорованих радіонуклідів у тварин II генерації наведено на рис. 1 та в табл. 2.

Для оцінки органометричних ознак дослідних тварин застосовували метод морфофізіологічних індикаторів (МФІ) [18], що широко використовується в екологічних дослідженнях стану і прогнозу розвитку популяцій тварин за впливу негативних чинників довкілля. МФІ кровотворних органів СЗ та СН особин нориці рудої представлено на рис. 2.

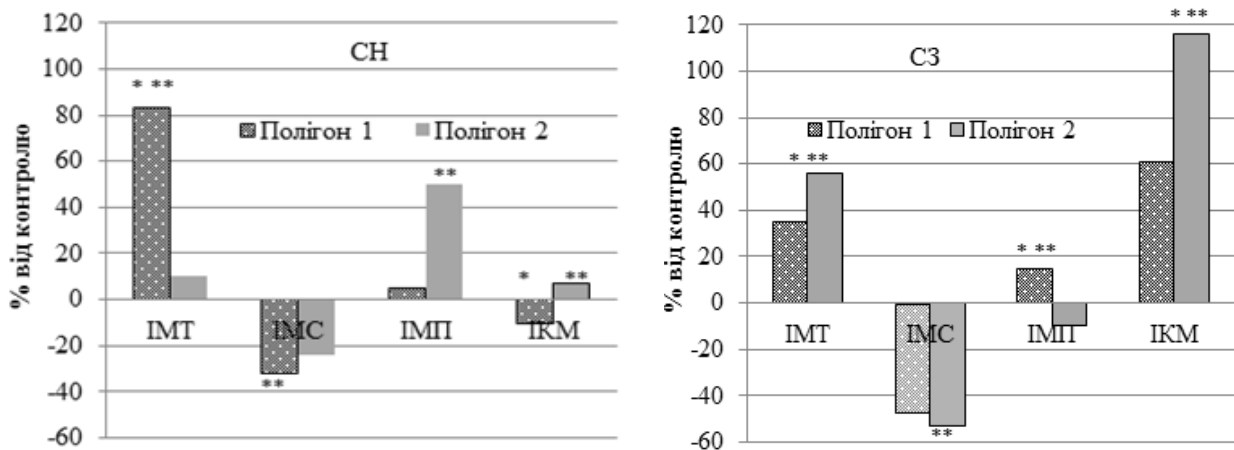


Рис. 2. Морфофізіологічні індекси у тварин різного функціонального стану: ІМТ - індекс маси тимуса; ІМС - індекс маси селезінки; ІМП - індекс маси печінки; ІКМ - індекс кісткового мозку; * - вірогідна різниця між полігонами; ** - вірогідна різниця між СН та СЗ тваринами.

Аналіз МФІ кровотворних органів нориць виявив відмінності між територіальними та функціональними групами тварин. У всіх особин, незалежно від ступеня статевої зрілості, реєстрували гіперплазію тимуса, що може опосередковано

свідчити про інтенсифікацію процесів дозрівання Т-лімфоцитів у даному органі та активацію клітинного імунітету. Спостерігали збільшення ІМТ у СН тварин з полігону 1 у 1,8 раза та у СЗ з полігону 2 – у 1,5 раза порівняно з контролем.

У дослідних нориць виявлено достовірне зниження ІМС порівняно з даними тварин із фонових територій. Слід відзначити більш виражені зміни у СЗ цьогорічок, зумовлені, імовірно, більш тривалим знаходженням тварин в умовах хронічної дії іонізуючого опромінення. Селезінка – важливий кровотворний орган, депо елементів крові, що виконує важливу функцію в імунному статусі організму, зокрема у процесах дозрівання та активації лімфоцитів за дії екзогенних та ендогенних агентів. Зниження маси селезінки може бути зумовлено як деструктивними процесами в самому органі, так і порушеннями в системі гемопоезу у тварин, які знаходяться в умовах хронічного радіаційного впливу. У всіх дослідних тварин реєстрували достовірне зниження кількості спленоцитів як в органі, так і на одиницю маси органа. Найменшу кількість спленоцитів (на 1 мг селезінки) реєстрували у СН тварин з полігону 2 ($0,09 \pm 0,01 \cdot 10^6/\text{мг}$ органа, порівняно з $1,29 - 1,55 \cdot 10^6/\text{мг}$ у контролі), у СН нориць з полігону 1 цей показник становив $0,61 \pm 0,05 \cdot 10^6/\text{мг}$ органа, а у СЗ тварин обох полігонів кількість спленоцитів була практично однаковою ($0,48 - 0,50 \cdot 10^6/\text{мг}$ органа). Отже, тривалий радіаційний вплив іонізуючої радіації призводить до редукції маси органа та зниження кровотворної потенції селезінки в опроміненних тварин.

Печінка відіграє провідну роль у кровотворенні в період ембріонального розвитку; після формування кісткової тканини печінкове кровотворення повністю замінюється кістковомозковим (медулярним), унаслідок чого гемопоетичні клітини в ній практично відсутні. При порушенні кістковомозкового кровотворення за радіаційної дії в печінці можуть відновлюватися активні осередки кровотворення, що може супроводжуватися гепатомегалією та порушеннями нормального функціонування органа. У нашому експерименті при дослідженні МФІ печінки в більшості нориць не виявлено суттєвих відмінностей від

контролю. Достовірне збільшення ІМП реєстрували лише у СН тварин з полігону 2.

Дослідження змін у кровотворній системі включають підрахунок клітин кісткового мозку, який є основним джерелом стовбурових кровотворних елементів як для мієлоїдного, так і лімфоїдного ростків кровотворення. Зазвичай кількість клітин кісткового мозку розраховують на стегнову кістку, але для більш точного співставлення отриманих даних у тварин різної маси ми розраховували даний показник на одиницю маси тіла. На рис. 3 представлено зміни ІКМ у СЗ та СН нориць обох дослідних полігонів відносно даних контрольної групи. Слід окремо відзначити, що у СЗ тварин контрольної групи порівняно із СН спостерігали зниження загальної клітинності кісткового мозку (з $0,59 \pm 0,03$ у СН до $0,36 \pm 0,06 \cdot 10^6/\text{стегнова кістка/г}$ у СЗ), що може бути пов'язано із процесами природного старіння або особливістю особин, народжених навесні. У дослідних тварин на радіонуклідно-забруднених територіях даного ефекту не спостерігали. Навпаки, у всіх СЗ тварин реєстрували підвищену кількість мієлокаріоцитів у порівнянні з відповідним віковим контролем, що, очевидно, зумовлено стимуляцією процесів кровотворення в кістковому мозку тривалою дією іонізуючого опромінення в малих дозах. Таким чином, неоднозначний характер змін морфофізіологічних індексів за дії хронічного радіаційного впливу свідчить про напружений фізіологічний стан організму.

Інтегральним показником стану кістковомозкового кровотворення є рівень зрілих функціонуючих клітин у крові, що продукуються в кістковому мозку. Результати досліджень загальної кількості еритроцитів, лейкоцитів у периферичній крові та вмісту клітин кісткового мозку (КМ) (із розрахунку на стегнову кістку) у нориць дослідних груп з урахуванням ступеня статевої зрілості у порівнянні з відповідним видовим та віковим контролем наведено в табл. 2.

Таблиця 2. Гематологічні показники особин нориць рудої різних генерацій

| Показник | СН | | | СЗ | | |
|---|-------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|
| | Контроль | Полігон 1 | Полігон 2 | Контроль | Полігон 1 | Полігон 2 |
| Клітини КМ, $10^6/\text{стегн. кістка}$ | $14,35 \pm 0,57$ | $17,46 \pm 0,46$ | $12,59 \pm 0,96$ | $23,62 \pm 2,09$ | $24,48 \pm 1,53$ | $20,95 \pm 1,47$ |
| ІКМ, $10^6/\text{г маси}$ | $0,59 \pm 0,03$ | $0,53 \pm 0,05$ | $0,63 \pm 0,02$ | $0,36 \pm 0,06^{***}$ | $0,58 \pm 0,14^*$ | $0,78 \pm 0,20$ |
| Еритроцити, $10^{12}/\text{л}$ | $11,34 \pm 0,36$ | $9,40 \pm 0,57$ | $8,3 \pm 1,0^*$ | $10,81 \pm 0,31$ | $9,12 \pm 0,47$ | $10,8 \pm 0,35$ |
| Гемоглобін, г/л | $144,6 \pm 7,0$ | $97,92 \pm 5,93^*$ | $115,0 \pm 5,0^*$ | $139,0 \pm 3,81$ | $105,5 \pm 5,69^*$ | $130 \pm 4,52$ |
| Кольоровий показник | $0,38 \pm 0,01$ | $0,31 \pm 0,01$ | $0,42 \pm 0,03$ | $0,39 \pm 0,02$ | $0,35 \pm 0,01$ | $0,35 \pm 0,05$ |
| Тромбоцити, $10^9/\text{л}$ | $262,08 \pm 14,5$ | $230,45 \pm 13,01$ | $165,0 \pm 15,0^{***}$ | $259,2 \pm 17,8$ | $161,25 \pm 17,26^{***}$ | $220 \pm 12,51$ |

| | | | | | | |
|--|------------------------------------|---|-------------------------------------|---|---|------------------------------------|
| Лейкоцити, $10^9/\text{л}$ | $2,87 \pm 0,09$ | $5,27 \pm 0,43^*$ | $4,9 \pm 0,2^*$ | $2,8 \pm 0,25$ | $4,35 \pm 0,81^*$ | $6,1 \pm 1,12$ |
| Нейтрофільні метамієлцити, % $10^9/\text{л}$ | – | $0,27 \pm 0,19$ $0,01 \pm 0,001$ | – | – | $0,75 \pm 0,48$ $0,03 \pm 0,004$ | – |
| Паличко-ядерні, % $10^9/\text{л}$ | $5,33 \pm 0,67$ $0,15 \pm 0,02$ | $1,72 \pm 0,43^*$ $0,09 \pm 0,02$ | $1,5 \pm 0,5^*$ $0,07 \pm 0,02$ | $3,0 \pm 0,58$ $0,08 \pm 0,01$ | $2,0 \pm 0,41$ $0,08 \pm 0,02$ | $0,5 \pm 0,04$ $0,03 \pm 0,01$ |
| Сегментоядерні, % $10^9/\text{л}$ | $25,0 \pm 2,52$ $0,71 \pm 0,05$ | $8,14 \pm 1,83^*$ $0,43 \pm 0,1^*$ | $8,0 \pm 4,0^*$ $0,4 \pm 0,21$ | $16,33 \pm 2,18$ $0,46 \pm 0,08$ | $13,0 \pm 1,58^{***}$ $0,56 \pm 0,1$ | $5,0 \pm 2,53$ $0,31 \pm 0,15$ |
| Нейтрофіли всього, % $10^9/\text{л}$ | $27,5 \pm 0,5$ $0,81 \pm 0,01$ | $11,05 \pm 1,79^*$ $0,58 \pm 0,1$ | $9,5 \pm 3,5^*$ $0,47 \pm 0,19$ | $19,33 \pm 2,33^{***}$ $0,54 \pm 0,08^{***}$ | $15,75 \pm 1,89^{***}$ $0,67 \pm 0,11$ | $5,5 \pm 2,7$ $0,33 \pm 0,17$ |
| Еозинофіли, % $10^9/\text{л}$ | $5,0 \pm 0,58$ $0,14 \pm 0,01$ | $3,09 \pm 0,31$ $0,16 \pm 0,02$ | $3,0 \pm 1,0$ $0,14 \pm 0,04$ | $3,0 \pm 0,58$ $0,08 \pm 0,02$ | $5,5 \pm 0,64^{***}$ $0,23 \pm 0,04^*$ | $3,0 \pm 2,53$ $0,18 \pm 0,09$ |
| Базофіли, % $10^9/\text{л}$ | – | $0,73 \pm 0,33$ $0,03 \pm 0,01$ | $0,5 \pm 0,5$ $0,02 \pm 0,02$ | – | $0,75 \pm 0,48$ $0,04 \pm 0,02$ | $1,0 \pm 0,08$ $0,06$ |
| Лімфоцити, % $10^9/\text{л}$ | $65,5 \pm 1,5$ $1,93 \pm 0,08$ | $84,14 \pm 1,94^*$ $4,44 \pm 0,39^*$ | $83,0 \pm 1,0$ $4,06 \pm 0,12^*$ | $74,7 \pm 2,18$ $2,09 \pm 0,18$ | $74,25 \pm 2,39$ $3,21 \pm 0,58^*$ | $89,0 \pm 2,44$ $5,43 \pm 0,87$ |
| Моноцити, % $10^9/\text{л}$ | $2,0 \pm 0,58$ $0,06 \pm 0,001$ | $1,82 \pm 0,67$ $0,10 \pm 0,03^*$ | $3,0 \pm 1,0$ $0,14 \pm 0,04^*$ | $3,0 \pm 0,58$ $0,09 \pm 0,02$ | $1,25 \pm 0,25$ $0,06 \pm 0,02$ | $1,0 \pm 0,08$ $0,06 \pm 0,02$ |

* Вірогідна різниця з контролем.

** Вірогідна різниця між полігонами 1 і 2.

*** Вірогідна різниця між СН та СЗ.

У дослідних нориць відмічали зниження концентрації еритроцитів та гемоглобіну у порівнянні з контрольною групою. Тільки у СН тварин з полігону 2 на фоні зниження кількості еритроцитів відмічали підвищений вміст гемоглобіну в еритроциті у порівнянні з норицями полігону 1. Це може свідчити про наявність у периферичній крові еритроцитів більшої ємності, що є проявом компенсаторних механізмів забезпечення нормальної оксигенації тканин. У цих тварин вміст тромбоцитів у периферичній крові також був достовірно зниженим. Слід підкреслити, що саме у цій групі відмічено суттєве збільшення ІМП, тобто не можна виключити факт впливу патологічних змін у печінці на процеси кровотворення.

У дослідних тварин у порівнянні з контролем реєстрували достовірний лейкоцитоз за рахунок фракції лімфоцитів на фоні збільшення маси тимуса (див. рис. 2), що підтверджує наше припущення про можливу активацію Т-ланки імунітету. Крім того, при аналізі лейкоцитарної формули виявлено зниження як за відносними, так і за абсолютними даними кількості нейтрофільних гранулоцитів як паличкоядерних, так і сегментоядерних форм. Наявність нейтропенії може призводити до зниження клітинного імунітету та захисних можливостей організму. У СЗ тварин відзначали достовірне збільшення кількості еозинофілів, що опосередковано вказує на наявність паразитарної інфекції та/або аутоалергічних реакцій в організмі внаслідок дії хронічного опромінення, мікродеструкції тканин у місцях депонування радіонуклідів тощо. У СЗ нориць також реєстрували збільшення кількості молодих форм у популяції

нейтрофілів на фоні зниження зрілих форм. Достовірні зміни виявлено як між територіальними, так функціональними групами тварин.

Аналогічні зміни гематологічних показників реєстрували й у тварин роду *Apodemus*, серед яких у СЗ тварин відзначено збільшення кількості еозинофілів та зниження вмісту нейтрофільних гранулоцитів практично у 2 рази порівняно з контролем. У той же час у представників даного виду лімфоцитози були менш вираженими порівняно з норицею рудою, що може бути зумовлено меншим вмістом ^{90}Sr .

Відомо, що лейкоцитарна формула є показником збалансованості гомеостазу організму в цілому. Перебудова лейкоцитарного складу периферичної крові часто відбувається завдяки загальній мобілізації захисних та компенсаторних механізмів організму, що відображається на величинах лейкоцитарних індексів. Аналіз співвідношень окремих фракцій клітин дає змогу оцінити неспецифічну реактивність організму, наявність запальних процесів, інфекційних захворювань та аутоімунних реакцій, порушення процесів дозрівання клітин кісткового мозку тощо. Для виявлення порушень у системі кровотворення у мишо-подібних, які мешкали на забруднених радіонуклідами територіях визначали індекс напруженості адаптації Гаркаві (ІНА), індекс імунореактивності (ІР) та індекс ядерного зсуву нейтрофілів (ІЯЗ). ІНА – співвідношення кількості лімфоцитів до сегментоядерних нейтрофілів у лейкоцитарній формулі свідчить про рівень активації лімфоїдної ланки кровотворної системи. ІР базується на співвідношенні відносного вмісту лімфоцитів та

еозинофілів крові до числа моноцитів та відображає баланс лімфокінів і монокінів. ІЯЗ відображає співвідношення між молодими та зрілими нейтрофілами. Високі значення ІЯЗ реєструються при інфекційних захворюваннях, за дії стресових чинників тощо. Зміни ІЯЗ унаслідок опромінення, особливо внутрішнього, можуть вказувати на порушення процесів проліферації та дозрівання в кістковому мозку. На рис. 3 і 4 представлено зміни лейкоцитарних індексів у дослідних тварин різного функціонального статусу з територій з різним рівнем радіонуклідного забруднення. Як видно з рис. 3, а у СН тварин обох полігонів проаналізовані індекси значно перевищують дані контролю: ІНА практично у

5 разів, ІП у 1,5 раза, ІЯЗ до 3 разів. При цьому тенденція до більш виражених змін спостерігається на полігоні 1, де рівень опромінення вищий, особливо це стосується ІЯЗ, за даними якого встановлена вірогідна різниця між полігонами ($p < 0,01$). З віком, з накопиченням дози опромінення, у СЗ нориць полігону 1 ІНА практично відповідає контролю, але при цьому значно збільшуються значення ІП та ІЯЗ, що вказує на можливий зрив адаптації та посилення процесів ураження кісткового мозку (див. рис. 3, б). На полігоні 2 при меншій дозі опромінення з віком у СЗ тварин ІНА залишається на тому ж збільшеному рівні, що й у СН, а відповідно до значень ІП відбувається активація імунних процесів.

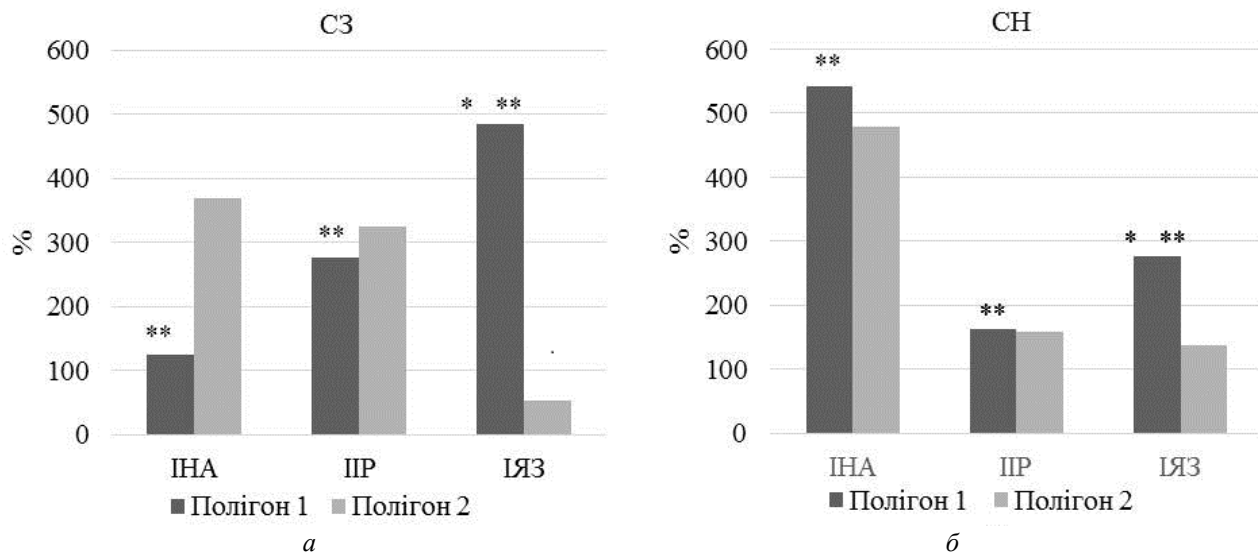


Рис. 3. Лейкоцитарні індекси у СН (а) та СЗ (б) нориць із дослідних полігонів у порівнянні з даними контрольної групи (контроль прийнято за 100 %). *- вірогідна різниця між полігонами; ** - вірогідна різниця між СН та СЗ тваринами.

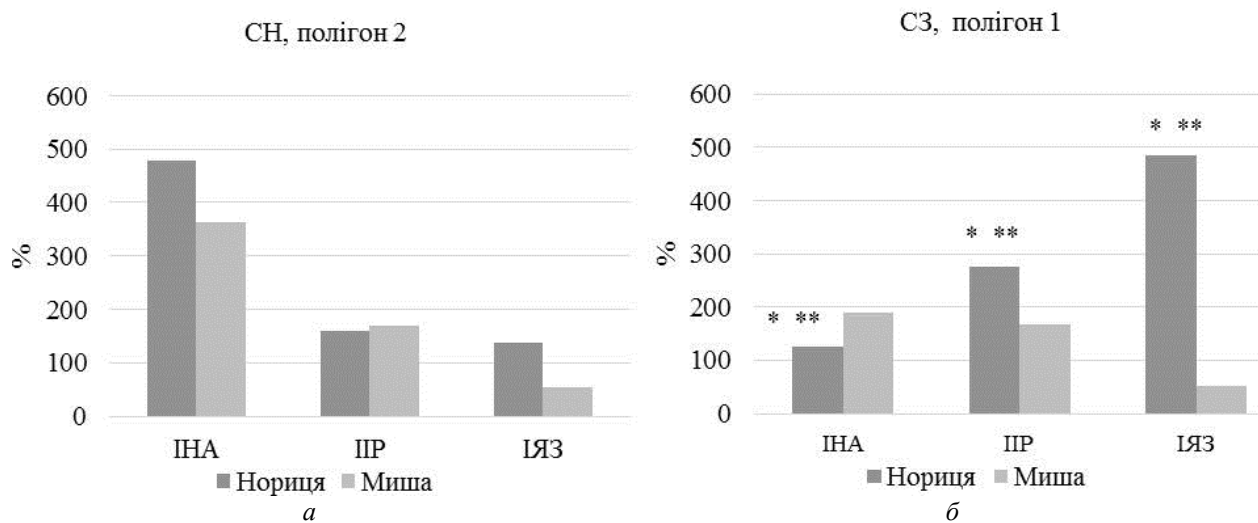


Рис. 4. Лейкоцитарні індекси у СН (а) та СЗ (б) тварин дослідних полігонів у порівнянні з даними відповідної контрольної групи (контроль прийнято за 100 %). *- вірогідна різниця між полігонами; ** - вірогідна різниця між СН та СЗ тваринами.

Слід відзначити, що тварини родів *Apodemus* і *Myodes* на території одного полігону отримували різні дозові навантаження, що зумовлено видовою специфікою харчування, вмістом радіонуклідів у добовому раціоні тварин, поведінкою у природних умовах, особливостями добової активності. Як видно з даних, наведених на рис. 4, за більшістю лейкоцитарних індексів більш виражені зміни спостерігали в нориць.

У цілому в СН гризунів обох родів з полігону 2 встановлено вірогідну різницю у величинах ІНА та ІЯЗ, більш суттєві зміни реєстрували у тварин за більшого дозового навантаження (див. рис. 4, а).

Під час аналізу стану імунної системи за лейкоцитарними індексами у СЗ тварин на полігоні 1 з відносно високим рівнем опромінення (див. рис. 4, б) чітко видно більш виражені зміни в нориці руді. Привертає увагу факт незначного зниження ІЯЗ у мишей, на відміну від нориць, в яких цей показник перевищував контрольні значення більше, ніж у 4 рази. Ця різниця простежувалась на обох полігонах як у СН, так і СЗ тварин і може бути пов'язана з більш високим вмістом ^{90}Sr у тілі нориць та відповідно більшими змінами в кістковому мозку. Кількість мієлокаріоцитів у мишей значно перевищує показники у нориць: на полігоні 1 у СЗ мишей загальна клітинність кісткового мозку на одиницю маси тіла була $1,49 \pm 0,61 \cdot 10^6$ /стегова кістка/г, проти $0,58 \pm 0,14 \cdot 10^6$ у нориці; на полігоні 2 цей показник для *Apodemus* дорівнював $1,01 \pm 0,04 \cdot 10^6$ /стегова кістка/г, а для нориць – $0,63 \pm 0,02 \cdot 10^6$. Проте за даними спектрометрії вміст ^{137}Cs у мишей полігону 2 був у 1,5 рази більшим, ніж у нориць (див. рис. 1). Можливо, саме з цим фактом пов'язана більш виражена гіперплазія тимуса у мишей, в яких ІМТ $1,52 \pm 0,21 \cdot 10^6$ мг/г, тоді як у нориць того ж віку на цьому полігоні – $0,58 \pm 0,14 \cdot 10^6$. Тобто біологічні ефекти в системі крові за дії малих доз радіації, індуковані внутрішнім опроміненням, залежать не тільки (або не стільки) від сумарної поглинутої дози опромінення, скільки від тропності та специфіки інкорпорованих радіонуклідів. При превалюванні ^{90}Sr в організмі тварин більшою мірою фіксуються ураження кіст-

кового мозку, а за дії ^{137}Cs , для якого характерний відносно рівномірний розподіл по організму, частіше спостерігаються зміни в лімфоцитарній ланці імунної системи.

Аналіз гематологічних даних свідчить, що кровотворна система у тварин із дослідних полігонів знаходиться в стані активації компенсаторно-приспосувальних процесів, що проявляється порівняно з інтактним контролем у збільшенні практично у 2 рази ІМТ, кількості лейкоцитів, індексів неспецифічної реактивності (ІНА, ІР). Аналогічний ефект ми відзначали раніше при дослідженні стану кровотворної системи у нориць з інших полігонів зони відчуження ЧАЕС [19]. У цьому дослідженні більш виражені зміни спостерігали у СН нориць полігону 1 при відносно високій потужності опромінення радіонуклідами ^{90}Sr . Проте при накопиченні дози внутрішнього опромінення з віком тварин відбувається поступове зниження пристосувальних реакцій: у СЗ нориць знижуються індекси реактивності, у периферичній крові збільшується кількість молодих нейтрофілів, що свідчить про дисбаланс процесів кровотворення у кістковому мозку.

У СН нориць з осушених ділянок ложа ВО (полігон 2), в яких вміст ^{90}Sr був значно нижчим, меншою мірою були виражені процеси активації кровотворення, спостерігалась достовірна різниця порівняно з СН норицями полігону 1 за показниками ІМТ. Відмінністю кровотворної системи роду *Apodemus* була висока клітинність кісткового мозку, але загальна тенденція змін у системі кровотворення відповідала таким у *Myodes*.

Таким чином, різнонаправлені зміни параметрів кровотворних органів та периферичної крові у тварин з територій осушеного дна ВО ЧАЕС можна розглядати як компенсаторно-приспосувальні реакції на дію стрес-агентів довкілля в умовах екологічної трансформації радіаційно забрудненого середовища. В умовах підвищеного хронічного дозового навантаження у СЗ тварин відбувається поступове зниження пристосувальних реакцій, що призводить до дисбалансу в системі кістковомозкового кровотворення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.П. Процак, О.О. Одінцов. Оцінка форм знаходження чорнобильських радіонуклідів у донних відкладеннях водойми-охолоджувача ЧАЕС. *Ядерна фізика та енергетика* 15(3) (2014) 259.
2. ICRP Publication 108. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Ann. ICRP 38 (2008) 4.
3. С.П. Гащак и др. Особенности видового состава насекомоядных (Insectivora) и грызунов (Rodentia) Чернобыльской зоны отчуждения. *Вестник зоологии* 34 (2000) 51.
4. Е.Б. Григоркина и др. Мелкие млекопитающие в зоне Восточно-Уральского радиоактивного следа: 50 лет спустя. Вопросы радиационной безопасности. Спец. вып.: Восточно-Уральскому радиоактивному следу – 50 лет (2007) 68.
5. Д.З. Шибкова, А.В. Аклев. *Адаптационно-компенсаторные реакции системы кровотообразования*

- при хроническом радиационном воздействии (Челябинск: Изд-во ЧГПУ, 2006) 328 с.
6. А.Г. Кудяшева и др. Мониторинг популяций мышевидных грызунов, обитающих в условиях повышенного радиационного фона. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 3(2) (2005) 119.
 7. К.И. Маслова и др. *Атлас патоморфологических изменений у полевок-экономок из очагов локального радиоактивного загрязнения* (Москва: Наука, 1994) 187 с.
 8. Э.А. Гилева. *Эколого-генетический мониторинг с помощью грызунов (уральский опыт)* (Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 1996) 106 с.
 9. Г.В. Оленев. Определение возраста цикломорфных грызунов, функционально-онтогенетическая детерминированность, экологические аспекты. *Экология* 40 (2009) 93.
 10. О.С. Монастирська. *Клінічні лабораторні дослідження*. Під ред. М.Б. Шегедін (Вінниця: Нова книга, 2007) 165 с.
 11. Л.Х. Гаркави, Е.Б. Квакина, М.А. Уколова. *Адаптационные реакции и резистентность организма*. 2-е изд., доп. (Ростов-н/Д.: Изд-во Ростов. ун-та, 1990) 224 с.
 12. M.L. Turgeon. *Clinical Hematology: Theory and Procedures*. 5-th ed. (Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2011) 632 p.
 13. R.E. Raskin, K.S. Latimer, H. Tvedten. Small Animal Clinical Diagnosis by Laboratory Methods. *Leukocyte Disorders* (2004) 63.
 14. Ю.А. Маклюк и др. Величина и структура дозовых нагрузок у мелких млекопитающих чернобыльской зоны через 19 лет после аварии. *Ядерна фізика та енергетика* 3(21) (2007) 81.
 15. А.И. Ильенко, П.Т. Крапивко. *Экология животных в радиационном биогеоценозе* (Москва: Наука, 1989) 224 с.
 16. Г.В. Оленев. Функционально-онтогенетический подход в изучении популяций цикломорфных млекопитающих: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук (Екатеринбург, 2004) 47 с.
 17. Е.Б. Григоркина, Г.В. Оленев. Роль поливариантности развития животных в оценке последствий радиационного воздействия. *Радиационная биология. Радиоэкология* 55(1) (2015) 16.
 18. С.С. Шварц, В.С. Смирнов, Л.Н. Добринский. *Метод морфофизиологических индикаторов в экологии наземных позвоночных* (Свердловск, 1968) 378 с.
 19. Н.К. Родіонова та ін. Вплив радіаційних умов зони відчуження ЧАЕС на кровотворну систему нориці рудої. *Ядерна фізика та енергетика* 20(1) (2019) 44.

**A. I. Lypska^{1*}, N. K. Rodionova¹, N. M. Riabchenko¹,
O. O. Burdo¹, D. O. Vyshnevskiy², H. Ishiniwa³**

¹ Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

² Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve, Chornobyl, Ukraine

³ Fukushima University, Fukushima, Japan

*Corresponding author: lypska@kinr.kiev.ua

ESTIMATION OF STATUS OF SMALL RODENTS' NATURAL POPULATIONS FROM THE TRANSFORMED ECOSYSTEMS OF THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE ACCORDING TO THE COMPLEX OF BIOLOGICAL INDICATORS

Morphophysiological and hematological parameters of different species and ontogenesis types of mice rodents from the drained areas of the Chornobyl cooling pond were studied for the first time; comparative analysis, including data of control and stable populations of the Chornobyl exclusion zone, was performed. Radioecological characterization of the research sites was carried out; the contents of the main dose-forming radionuclides were determined; animals' exposure doses were estimated. In all experimental groups, similar changes in the hematopoietic system were observed, however, pathological features were less pronounced in individuals from the drained areas of the cooling pond. It was revealed that in the animal body under the chronic low dose exposure activation of compensatory and recovery processes occurs along with the destructive processes. It has been shown that the lifetime increase in radiation exposure of mature animals causes the imbalance of bone marrow hematopoiesis with the gradual exhaustion of blood system potential.

Keywords: Chornobyl exclusion zone, rodents, radionuclides, blood system, morphophysiological indicators, ontogenetic approach.

REFERENCES

1. V.P. Protsak, O.O. Odintsov. Assessment of forms finding of Chernobyl radionuclides in bottom sediments of cooling pond of the ChNPP. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 15(3) (2014) 259. (Ukr)
2. ICRP Publication 108. Environmental Protection – the Concept and Use of Reference Animals and Plants. *Ann. ICRP* 38 (2008) 4.
3. S.P. Gashchak et al. Features of the species composition of insectivores (Insectivora) and rodents (Rodentia) of the Chornobyl exclusion zone. *Vestnik Zoologii* 34 (2000) 51. (Rus)

4. E. B. Grigorkina et al. Small mammals in the zone of the East-Ural radioactive trace: 50 years later. *Voprosy Radiatsionnoy Bezopasnosti. Special Issue: The East-Ural radioactive trace is 50 years old* (2007) 68. (Rus)
5. D.Z. Shibkova, A.V. Akleev. *Adaptive-Compensatory Reactions of the Hematopoietic System under Chronic Radiation Exposure* (Chelyabinsk: Publishing House of Chelyabinsk State Pedagogical University, 2006) 328 p. (Rus)
6. A.G. Kudyasheva et al. Monitoring of wild rodents population inhabiting areas with increased radiation background. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsiy i Chornobylya (Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl)* 3(2) (2005) 119. (Rus)
7. K.I. Maslova et al. *Atlas of Pathomorphological Changes in Root Voles from Hotspots of Local Radioactive Contamination* (Moskva: Nauka, 1994) 187 p. (Rus)
8. E.A. Gilev. *Ecological and Genetic Monitoring with the Help of Rodents* (Ural experience) (Yekaterinburg: Publishing House of Ural University, 1996) 106 p. (Rus)
9. G.V. Olenov. Determination of the age of cyclomorphic rodents, functional and ontogenetic determination, ecological aspects. *Ekologiya* 40 (2009) 93. (Rus)
10. O.S. Monastyrskaya. *Clinical Laboratory Studies*. Ed. by M.B. Shegedyn (Vinnytsia: Nova Knyga, 2007) 165 p. (Ukr)
11. L.Kh. Garkavi, E.B. Kvakina, M.A. Ukolova. *Adaptive Reactions and Body Resistance*. 2-nd ed., add. (Rostov-na-Donu: Publishing House of Rostov University, 1990) 224 p. (Rus)
12. M.L. Turgeon. *Clinical Hematology: Theory and Procedures*. 5-th ed. (Philadelphia: Lippincott Williams & Wilkins, 2011) 632 p.
13. R.E. Raskin, K.S. Latimer, H. Tvedten. Small Animal Clinical Diagnosis by Laboratory Methods. *Leukocyte Disorders* (2004) 63.
14. Yu.A. Marlyuk et al. Values and structure of dose burdens in small mammals of the Chernobyl zone in 19 years after the accident. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 3(21) (2007) 81. (Rus)
15. A.I. Ilyenko, P.T. Krapivko. *Ecology of Animals in Radiation Biogeocenosis* (Moskva: Nauka, 1989) 224 p. (Rus)
16. G.V. Olenov. Functional Ontogenetic Approach to the Study of Populations of Cyclomorphic Mammals. Thesis abstract of doctor of Biological Sciences (Ekaterinburg, 2004) 47 p. (Rus)
17. E.B. Grigorkina, G.V. Olenov. Role of Polyalternativeness of Animals' Ontogeny Development in the Estimation of Ionizing Radiation Consequences. *Radiatsionnaya Biologiya. Radioekologiya* 55(1) (2015) 16. (Rus)
18. S.S. Shvarts, V.S. Smirnov, L.N. Dobrinskiy. *Method of Morphophysiological Indicators in the Ecology of Terrestrial Vertebrates* (Sverdlovsk, 1968) 378 p. (Rus)
19. N.K. Rodionova et al. Influence of radiation conditions of the Chernobyl Exclusion Zone on the hematopoietic system of bank vole. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 20(1) (2019) 44. (Ukr)

Надійшла/Received 08.07.2020