

Ліщук Світлана Георгіївна 

кандидатка сільськогосподарських наук,
доцентка кафедри нормальної та патологічної морфології і фізіології
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет», Україна

ФАГОЦИТАРНА АКТИВНІСТЬ ГЕТЕРОФІЛІВ ПТИЦІ ЯК БІОМАРКЕР ХРОНІЧНОГО НИЗЬКОДОЗОВОГО ВПЛИВУ РАДІАЦІЙНОГО ОПРОМІНЕННЯ

Анотація. У роботі досліджено вплив малих поглинутих доз іонізуючого випромінювання на гематологічні, біохімічні та імунологічні показники крові курей, вирощених у зонах із різним рівнем радіаційного навантаження Полісся України. Встановлено підвищення кількості лейкоцитів, еритроцитів, вмісту загального білка та активності АСТ за умов хронічного опромінення. Одночасно виявлено зниження фагоцитарної активності гетерофілів, що свідчить про пригнічення неспецифічної резистентності організму птиці під впливом низькодозового радіаційного стресу. Виявлені зміни мають адаптаційно-компенсаторний характер і свідчать про ранні прояви імуномодулювального впливу хронічного низькодозового опромінення.

Вступ. Вивчення впливу малих доз іонізуючого випромінювання на організм сільськогосподарської птиці та інших біологічних об'єктів залишається актуальним напрямом сучасної радіобіології і ветеринарної медицини. Незважаючи на значну кількість досліджень, питання механізмів адаптації організму до тривалого низькодозового опромінення та визначення меж його безпечного впливу остаточно не з'ясовані. Особливу увагу приділяють змінам клітинного імунітету, зокрема фагоцитарній активності лейкоцитів, яка вважається чутливим показником радіаційного навантаження [1, 2, 7].

Встановлено, що навіть низькі рівні іонізуючої радіації можуть порушувати клітинний редокс-баланс, активувати утворення вільних радикалів і змінювати цитокінову регуляцію, що позначається на функціональному стані клітин крові [3]. Експериментальні дослідження показали, що хронічне опромінення у малих дозах спочатку може стимулювати гемопоєз, однак за тривалої дії спричиняє пригнічення фагоцитарної активності нейтрофілів, що свідчить про формування адаптаційних реакцій організму [2].

Особливого значення ця проблема набуває для територій, які зазнали радіоактивного забруднення після аварії на Чорнобильській АЕС. У ґрунтах,

воді та кормах Полісся України досі зберігаються радіонукліди Cs-137 та Sr-90, здатні накопичуватися в організмі птиці й викликати внутрішнє опромінення [5,7]. Хронічний характер такого впливу може порушувати процеси кровотворення та знижувати природну резистентність організму [4].

Сучасні дослідження розглядають ефекти малих доз не лише як чинник патології, а і як стимул до розвитку адаптаційно-компенсаторних реакцій. Так, Lumniczku та співавт. (2021) повідомляють про імуномодулюючий ефект низькодозового опромінення, який супроводжується одночасним зниженням фагоцитарної активності та активацією антиоксидантного захисту [8]. Azzam E.I. (2012) встановили нелінійну залежність між дозою випромінювання та клітинною відповіддю [3].

За даними ICRP (2020) і WHO (2023), тривалий вплив малих доз радіації не є біологічно нейтральним, оскільки викликає накопичення субклітинних змін у кровотворній та імунній системах [6, 9]. Дослідження, проведені у господарствах Подільського регіону, також підтвердили зниження фагоцитарної активності нейтрофілів у тварин, зміни білкового складу сироватки крові та морфологічні порушення клітин за умов підвищеного радіонуклідного навантаження [1, 2].

Отже, оцінка стану клітин крові та фагоцитарної активності гетерофілів та моноцитів у птиці є важливою для з'ясування механізмів радіаційної адаптації та вдосконалення систем біомоніторингу в умовах тривалого впливу малих доз іонізуючого випромінювання.

Мета роботи полягала в оцінюванні ступеня змін імунологічних та гематологічних показників периферичної крові птиці під впливом малої поглинутої дози іонізуючого випромінювання в умовах Полісся України.

Для реалізації поставленої мети здійснено відбір зразків крові у птиці, яка утримується в господарствах з різним рівнем радіоекологічного навантаження. У ході дослідження визначено ключові гематологічні та імунологічні параметри периферичної крові, а також проаналізовано залежність між величиною поглинутої дози й фагоцитарною активністю клітин для з'ясування характеру адаптаційних реакцій організму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Упродовж 2022–2024 років дослідження виконували на території північних і центральних районів Полісся України, зокрема в Житомирській, Київській та Рівненській областях. Обрані агроєкосистеми характеризувалися різним ступенем радіоактивного забруднення, основним індикатором якого був ізотоп Cs-137, що й нині залишається одним із провідних показників постчорнобильського радіаційного фону. Частину лабораторних аналізів і статистичне опрацювання

результатів проводили на кафедрі нормальної та патологічної морфології і фізіології факультету ветеринарної медицини і технологій у тваринництві Закладу вищої освіти «Подільський державний університет», а також у ветеринарній клініці «Vet Generation» у місті Київ.

Для проведення дослідження було сформовано три зони спостереження з різним рівнем радіаційного навантаження: перша контрольна – 0,8 мГр/рік, друга – 1,2 мГр/рік та третя – 1,5 мГр/рік. Радіоекологічний стан територій оцінювали за допомогою дозиметра-радіометра СРП-68-01 і гамма-спектрометра «Gamma M-1C». Вимірювання проводили на територіях птахівничих господарств, кормових угіддях та в місцях утримання птиці.

Розрахунок середньорічних доз зовнішнього та внутрішнього опромінення здійснювали на основі результатів спектрометричного аналізу відповідно до чинних методичних рекомендацій щодо оцінки радіаційного навантаження на сільськогосподарських тварин. Отримані значення не перевищували допустимих нормативів, визначених Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97).

У досліді використовували клінічно здорових курей яєчного напрямку продуктивності віком 5-6 місяців. Птицю утримували в господарствах із подібними умовами годівлі та мікроклімату, однак із різним ступенем радіоекологічного навантаження. Усі експериментальні процедури проводили відповідно до міжнародних вимог біоетики та законодавства України щодо гуманного поводження з тваринами.

Для порівняльного аналізу сформували три групи птиці: у першій контрольній зоні – 50 голів, у зоні з навантаженням 1,2 мГр/рік – 30 голів, а в зоні 1,5 мГр/рік – 25 голів. Групи були співставними за віком та фізіологічним станом.

Зразки крові відбирали в ранковий час із підкрильцевої вени (*v. cutanea ulnaris*). У крові визначали кількість еритроцитів і лейкоцитів, концентрацію гемоглобіну, показники гематокриту, ШОЕ (хоча цей показник використовують рідше через наявність ядерних еритроцитів). Для підвищення точності результати автоматичного аналізу верифікували методом світлової мікроскопії.

Функціональну активність лейкоцитів оцінювали методом визначення фагоцитозу *in vitro* із застосуванням латексних часток. Після фарбування мазків за Романовським–Гімзою проводили мікроскопічний аналіз. Визначали фагоцитарний показник – відсоток клітин, здатних до поглинання часток, а також фагоцитарний індекс – кількість латексних часток, поглинутих одним фагоцитом.

Крім того, у плазмі крові досліджували рівень загального білка, глюкози та активність ферментів АЛТ, АСТ і лужної фосфатази, які використовували як показники метаболічних змін під впливом радіаційного чинника.

Для оцінювання внутрішнього радіаційного навантаження визначали вміст Cs-137 та Sr-90 у ґрунтах та кормах методом гамма-спектрометрії. Найвищі показники активності Cs-137 зафіксовано у зоні 1,5 мГр/рік: у ґрунті – $95,4 \pm 8,6$ Бк/кг, у кормах – $32,1 \pm 4,7$ Бк/кг. У контрольній зоні ці значення були значно нижчими – $7,9 \pm 1,3$ та $2,1 \pm 0,4$ Бк/кг відповідно. Отримані дані свідчать про закономірний перенос радіонуклідів по трофічному ланцюгу агроєкосистем.

Статистичну обробку результатів виконували із застосуванням програм Microsoft Excel 2019 та Statistica 10.0. Для оцінки достовірності відмінностей між групами використовували t-критерій Стюдента, а статистично значущими вважали результати при $p \leq 0,05$.

Під час клінічного огляду птиці суттєвих відхилень не виявлено. Усі кури були активними, мали задовільний апетит, нормальний стан слизових оболонок та не проявляли ознак інтоксикації, анемії чи інших патологічних змін.

Аналіз отриманих результатів показав, що у курей, які зазнавали впливу дози 1,5 мГр/рік, спостерігалися зміни окремих гематологічних показників порівняно з контрольною групою (табл. 1). Зокрема, кількість лейкоцитів була більшою на 28 % ($p < 0,01$), а вміст еритроцитів зростав приблизно на 18 % ($p < 0,05$). Такі зміни можна розглядати як прояв адаптаційної реакції організму на тривалий вплив низькоінтенсивного іонізуючого випромінювання. Для птиці характерна висока реактивність системи кровотворення, тому збільшення кількості формених елементів крові може бути наслідком активації гемопоезу.

Таблиця 1

**Гематологічні показники крові курей за різного
рівня радіаційного навантаження ($M \pm m$)**

Показник	0,8 мГр/рік (n=30)	1,2 мГр/рік (n=25)	1,5 мГр/рік (n=22)
Лейкоцити, $\times 10^9/\text{л}$	$24,1 \pm 1,2$	$27,8 \pm 1,4^*$	$30,9 \pm 1,5^{**}$
Еритроцити, $\times 10^{12}/\text{л}$	$2,7 \pm 0,1$	$2,9 \pm 0,1$	$3,2 \pm 0,1^*$
Гемоглобін, г/л	$92,4 \pm 4,1$	$95,6 \pm 4,4$	$98,1 \pm 4,3$
Гематокрит, %	$31,6 \pm 1,5$	$33,2 \pm 1,6$	$34,8 \pm 1,7$
ШОЕ, мм/год	$2,1 \pm 0,2$	$2,5 \pm 0,3$	$3,0 \pm 0,3^*$

[авторська розробка]

*Примітка: * – $p < 0,05$; * – $p < 0,01$ порівняно з контролем.

У групі з максимальним радіаційним навантаженням також відзначали збільшення швидкості осідання еритроцитів. Це може бути пов'язано зі зміною білкового складу плазми та розвитком неспецифічної стресової реакції. У птиці ШОЕ має меншу діагностичну стабільність, ніж у ссавців (цей

показник використовують рідше через наявність ядерних еритроцитів), однак його коливання можуть відображати зміни фізіологічного стану організму.

Підвищення концентрації загального білка (табл. 2) може свідчити про посилення білоксинтетичної функції печінки та активацію компенсаторних механізмів у відповідь на хронічний вплив радіаційного чинника.

Таблиця 2

**Біохімічні показники плазми крові курей
за різного рівня радіаційного впливу ($M \pm m$)**

Показник	0,8 мГр/рік	1,2 мГр/рік	1,5 мГр/рік
Загальний білок, г/л	48,6 $\pm$ 2,4	51,9 $\pm$ 2,1	55,4 $\pm$ 2,3*
Глюкоза, ммоль/л	10,2 $\pm$ 0,4	10,8 $\pm$ 0,5	11,3 $\pm$ 0,5
АЛТ, Од/л	8,4 $\pm$ 0,7	9,1 $\pm$ 0,8	10,2 $\pm$ 0,9
АСТ, Од/л	198,6 $\pm$ 9,4	214,8 $\pm$ 10,1	236,7 $\pm$ 11,2*
Лужна фосфатаза, Од/л	412,5 $\pm$ 22,6	438,4 $\pm$ 24,3	467,2 $\pm$ 25,8

[авторська розробка]

*Примітка: – $p < 0,05$ відносно контрольної групи.

Для курей більш інформативним біохімічним показником є активність АСТ, оскільки активність АЛТ у птиці фізіологічно невисока. Зростання рівня АСТ у дослідних групах може вказувати на підвищене функціональне навантаження на печінку та м'язову тканину.

Стан неспецифічної резистентності організму оцінювали за показниками фагоцитарної активності лейкоцитів (табл. 3). У птиці основними клітинами, що забезпечують фагоцитоз, є гетерофіли та моноцити.

У курей із групи 1,5 мГр/рік встановлено зниження фагоцитарного показника на 32 %, а фагоцитарного індексу на 36 % відносно контролю. Це може свідчити про пригнічення функціональної активності гетерофілів за умов тривалого впливу малих доз іонізуючого випромінювання. Імовірно, такі зміни пов'язані з поступовим виснаженням механізмів неспецифічного імунного захисту та розвитком адаптаційного стресу в організмі птиці.

Таблиця 3

**Показники фагоцитарної активності лейкоцитів
периферичної крові курей ($M \pm m$)**

Показник	0,8 мГр/рік	1,2 мГр/рік	1,5 мГр/рік
Фагоцитарний показник (ФП), %	52,4 $\pm$ 3,1	44,1 $\pm$ 2,7*	35,8 $\pm$ 2,4**
Фагоцитарний індекс (ФІ), част./клітину	3,9 $\pm$ 0,3	3,1 $\pm$ 0,2*	2,5 $\pm$ 0,2**

*Примітка: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ порівняно з контролем.

Мікрофотографія (рис. 1) відображає процес фагоцитозу гетерофілом — основною мікрофагальною клітиною периферичної крові птиці, яка функціонально відповідає нейтрофілам ссавців.

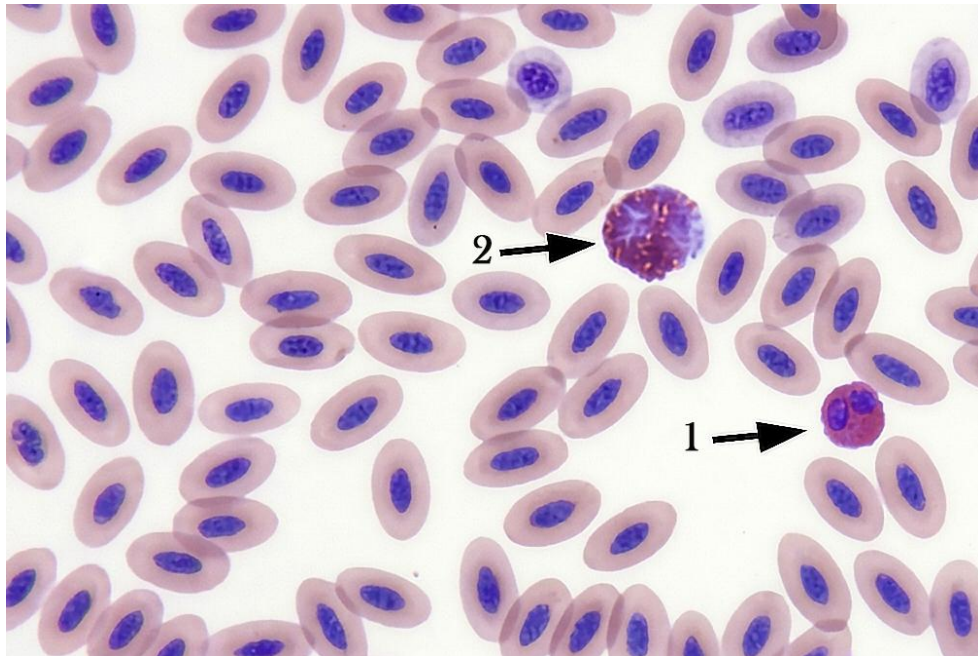


Рис. 1. Фагоцитарна активність гетерофіла периферичної крові птиці за дії іонізуючого випромінювання.

1 – гетерофіл у стадії дегрануляції;

2 – активний фагоцитоз клітинного детриту з утворенням фаголізосом.

Фарбування за Романовським-Гімзою.

Image Size: 1280x720; Real Size: 2 703,34 μm x 1 519,71 μm

Основний масив клітин на зображенні представлений еритроцитами птиці. Вони мають характерну для цього класу тварин фізіологічну морфологію: овальну або еліпсоподібну форму, оксифільну (рожево-оксидативну) цитоплазму та чітко локалізоване по центру овальне ядро з конденсованим базофільним хроматином, що забарвлене у фіолетово-синій колір. Еритроцити зберігають типову структуру, без виражених ознак дегенеративних змін (пойкілоцитозу чи анізоцитозу). У полі зору мікроскопу зрілий гетерофіл (1) – головна мікрофагальна клітина периферійної крові птиці. Клітина має округлу форму, сегментоване фіолетове ядро та специфічну зернистість.

Гетерофіл (2) перебуває у фазі активного фагоцитозу та дегрануляції, що свідчить про високу функціональну активність клітини. У його цитоплазмі чітко візуалізуються фіолетово забарвлені включення, які інтерпретуються як фрагменти клітинного детриту та ушкоджених структур, утворених унаслідок

патологічного впливу іонізуючого випромінювання. Наявність таких включень у фагосомах вказує на активне залучення гетерофіла до процесів неспецифічного імунного захисту, спрямованих на розпізнавання, поглинання та внутрішньоклітинне руйнування пошкоджених елементів.

Одночасно процес дегрануляції свідчить про вивільнення біологічно активних речовин і ферментів, необхідних для нейтралізації чужорідних агентів та очищення тканин від продуктів клітинного розпаду. Такі морфофункціональні зміни відображають активацію клітинної ланки природної резистентності організму птиці та мають компенсаторно-захисний характер, спрямований на підтримання тканинного і клітинного гомеостазу.

Висновки. Проведені дослідження показали, що в умовах Полісся України вплив іонізуючого випромінювання на рівні 1,5 мГр/рік не викликає у курей клінічно виражених змін, однак супроводжується достовірними змінами гематологічних показників. Встановлено підвищення кількості лейкоцитів та еритроцитів, що свідчить про активацію процесів гемопоезу під дією малих доз радіації. Одночасно відзначено зниження фагоцитарної активності гетерофілів на 35–38 % порівняно з контролем, що вказує на пригнічення неспецифічної клітинної резистентності.

Результати досліджень свідчать, що тривалий вплив малих доз іонізуючого випромінювання (до 2 мГр/рік) у курей супроводжується розвитком подвійної біологічної відповіді: стимуляцією процесів гемопоезу та одночасним пригніченням окремих ланок клітинного імунітету. Водночас виявлені зміни не виходили за межі фізіологічної адаптації та не супроводжувалися вираженими клінічними ознаками патології. Це дає підстави розглядати дозу 1,5 мГр/рік як рівень, за якого в організмі курей починають формуватися ранні прояви імуномодулювального впливу хронічного низькодозового опромінення.

Підвищення кількості еритроцитів, лейкоцитів і концентрації гемоглобіну можна розцінювати як адаптаційно-компенсаторну реакцію організму, спрямовану на підтримання стабільності внутрішнього середовища в умовах хронічного низькодозового опромінення. Виявлені зміни мають адаптаційно-компенсаторний характер і можуть розглядатися як прояв ранньої радіаційної адаптації організму птиці. Фагоцитарна активність гетерофілів може бути використана як чутливий біомаркер впливу малих доз іонізуючого випромінювання. Зростання еритроцитарних показників, імовірно, має антигіпоксичний характер, тоді як лейкоцитоз може бути пов'язаний з активацією неспецифічної резистентності організму.

Разом із цим зниження фагоцитарної активності гетерофілів свідчить про пригнічення функціонального стану клітин неспецифічного імунного захисту. Імовірною причиною таких змін є розвиток оксидативного стресу, порушення енергетичного обміну та зниження функціонального резерву фагоцитів.

Цитоморфологічний аналіз периферичної крові птиці за дії малих доз радіаційного забруднення зафіксував високу функціональну активність мікрофагальної ланки, що виражається у дегрануляції гетерофіла (1) та активному фагоцитозі клітинного детриту (2) на тлі збереженої структури ядерних еритроцитів. Виявлена інтенсифікація елімінації радіаційно-індукованих фрагментів пошкоджених структур свідчить про ефективне залучення клітин крові до процесів підтримання гомеостазу та забезпечення адаптаційно-компенсаторних реакцій організму.

Список використаних джерел:

1. Ліщук С., Савчук Л. Радіаційний моніторинг та порівняльний аналіз морфоімунологічних показників крові корів під час тривалого впливу малих доз радіонуклідів. Науковий прогрес та інновації. 2024. Т. 27. № 2. С. 78–83. <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.02.13>
2. Ліщук С. Г. Зміна фагоцитарної активності клітин крові свиней за впливу малої поглинутої дози іонізуючого випромінювання. *Подільський вісник: сільське господарство, техніка, економіка. Ветеринарні науки*. 2025. № 49. С. 273–278. DOI: <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.41>.
3. Azzam E.I., Jay-Gerin J.P., Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*. 2012. Vol. 327. No 1–2. P. 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2011.12.012>
4. Baloh M., Blazevic D., Petrovic S., Fesenko S. Evaluation of radiation exposure and transfer of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in pigs from contaminated areas. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2022. Vol. 245. P. 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106867>
5. Fesenko S., Howard B.J., Balonov M. Radioecological monitoring of agricultural animals after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2021. Vol. 233. P. 106603. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603>
6. ICRP (International Commission on Radiological Protection). Radiological protection of people and the environment (Publication 144). *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49. No 4. P. 11–145. DOI: 10.1177/0146645320906277.
7. Lishchuk S. Influence of ²³²Th and ⁹⁰Sr radionuclides on the state of natural animals resistance in radioactively contaminated territories of Ukraine. *Seria: Zeszyty Naukowe, Nr 87*. 2022. P. 37–46. DOI: <https://doi.org/10.58246/hs54m847>
8. Lumniczky K., Impens N., Armengaud J., Candéias S.M. Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environmental International*. 2021. Vol. 149. P. 106212. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212>
9. World Health Organization (WHO). Ionizing radiation: health effects and protective measures. Женева: WHO Press, 2023. URL: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures>