

УДК 619:612.014.482.4:636.4

DOI <https://doi.org/10.37406/2706-9052-2025-4.41>

Лішук С. Г.

кандидатка сільськогосподарських наук,
доцентка кафедри нормальної та патологічної морфології і фізіології,
Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
Кам'янець-Подільський, Україна
E-mail: itomlin@ukr.net
ORCID: 0000-0002-6294-5259

ЗМІНА ФАГОЦИТАРНОЇ АКТИВНОСТІ КЛІТИН КРОВІ СВИНЕЙ ЗА ВПЛИВУ МАЛОЇ ПОГЛИНУТОЇ ДОЗИ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

Анотація

Дослідження присвячене вивченню впливу малих поглинутих доз іонізуючого випромінювання на гематологічні та імунологічні показники свиней, які утримуються в агроєкосистемі Полісся України.

Проблема тривалої присутності у довкіллі радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs і ^{90}Sr , зумовлює нагальну потребу в чутливих біомаркерах субклінічних зрушень у продуктивних тварин. У результаті дослідження встановлено, що хронічне опромінення на рівні приблизно 1,5 мГр/рік супроводжується помірними, але статистично значущими трансформаціями гематологічних показників: реєструється підвищення чисельності еритроцитів і лейкоцитів, що інтерпретується як компенсаторна стимуляція кровотворення. Водночас виявлено виражене зниження фагоцитарної активності нейтрофілів, у середньому на 35–40% порівняно з контрольними тваринами, що вказує на ослаблення клітинної ланки природного імунітету та ймовірне виснаження фагоцитарного резерву за тривалого низькодозового навантаження. Одночасність адаптаційних і дисфункціональних процесів підкреслює нелінійну природу відповіді на малі дози іонізуючої радіації, включаючи порушення редокс-балансу, активацію або виснаження антиоксидантних механізмів та субклітинні зміни, що передують клінічним проявам.

Біохімічні показники плазми у більшості тварин залишалися в межах фізіологічних норм, що свідчить про адаптаційно-компенсаторний характер виявлених зрушень без розвитку явної системної патології.

Практичне значення роботи полягає у тому, що фагоцитарну активність нейтрофілів можна рекомендувати як інформативний ранній біомаркер впливу малих доз радіації на тварин і як інструмент для включення в програми екологічного та ветеринарно-санітарного моніторингу, спрямовані на оцінку ризиків і забезпечення безпеки тваринництва та кінцевих продуктів харчування.

Ключові слова: свині, іонізуюче випромінювання, фагоцитоз, ^{137}Cs , ^{90}Sr , периферична кров, радіоекологія.

Вступ. Проблема впливу малих доз іонізуючого випромінювання на організм сільськогосподарських тварин залишається однією з найважливіших у сучасній радіобіології та ветеринарній медицині. Незважаючи на тривалу історію вивчення цього питання, механізми адаптаційних реакцій і межі безпечних доз для біологічних систем досі залишаються предметом наукових дискусій. Особливу увагу приділяють вивченню змін клітинного імунітету, зокрема фагоцитарної активності лейкоцитів як одного з найбільш чутливих біомаркерів дії низькодозового хронічного опромінення [9].

Сьогодні відомо, що навіть незначні рівні іонізуючої радіації здатні змінювати редокс-гомеостаз клітин, викликати утворення активних форм кисню та порушення сигналізації цитокінів, що, своєю чергою, впливає на функціональну активність клітин крові [7]. Дослідження на лабораторних тваринах показали, що хронічне опромінення у малих дозах може призводити як до короткочасної стимуляції системи кровотворення, так і до пригнічення фагоцитарної активності нейтрофілів за тривалої дії, що свідчить про розвиток стану радіаційної адаптації [2; 5].

У контексті післяаварійних територій, зокрема зони Полісся України, проблема набуває особливого значення. За даними міжнародних досліджень, навіть через десятиліття після аварії на Чорнобильській АЕС у ґрунтах, воді та кормах зберігаються радіонукліди (^{137}Cs і ^{90}Sr), які здатні накопичуватися в організмах тварин і зумовлювати внутрішнє опромінення [4]. Такі процеси мають хронічний характер і можуть впливати на системи гемопоезу та імунної резистентності сільськогосподарських тварин, у тому числі свиней, які чутливо реагують на зміни середовища [3].

Важливим аспектом сучасних радіобіологічних досліджень є оцінка ефектів малих доз не лише у контексті патології, а й із погляду адаптаційно-компенсаторних механізмів. Зокрема, у роботах К. Люмницького та співавторів (2021) доведено, що низькодозове опромінення може викликати імуномодулюючі ефекти: зниження фагоцитарної активності поєднується з активацією антиоксидантного захисту [9]. Подібні результати отримані у Н. Хамади та Т. Сато (2022), які показали нелінійну залежність між дозою опромінення і вираженістю клітинної відповіді [5].

Ураховуючи дані сучасних міжнародних організацій, зокрема Міжнародної комісії з радіологічного захисту (ICRP, 2020) та Всесвітньої організації охорони здоров'я (WHO, 2023), тривала дія малих доз опромінення

не є біологічно нейтральною, а може зумовлювати накопичення субклітинних змін, що проявляються у чутливих системах організму, зокрема у кровотворній та імунній [6; 10].

Додатково слід відзначити, що радіоактивне забруднення аграрних ландшафтів формується внаслідок накопичення радіонуклідів, зокрема ^{137}Cs і ^{239}Pu , у ґрунтах, кормах і біологічних об'єктах. Установлено, що навіть тривалий вплив малих доз іонізуючого випромінювання викликає неспецифічні адаптаційні реакції організму, характерні для різних стадій стресового синдрому, а також стимулює розвиток компенсаторно-захисних механізмів у системі кровотворення та природної резистентності. Попередні дослідження на великій рогатій худобі, проведені в господарствах Подільського регіону, продемонстрували, що за підвищеного радіонуклідного навантаження відбувається зниження фагоцитарної активності нейтрофілів, зміни білкового спектра сироватки та морфологічні відхилення у клітинах крові, що відображає хронічну дію малих доз випромінювання [1; 8].

Таким чином, оцінка стану клітин крові свиней, особливо фагоцитарної активності лейкоцитів, у зонах із різним рівнем радіоекологічного навантаження має велике значення для розуміння механізмів радіаційної адаптації та розроблення систем біомоніторингу тваринництва в умовах малих доз іонізуючого випромінювання.

Мета роботи – оцінити ступінь змін імунологічних та гематологічних показників периферичної крові свиней під впливом малої поглинутої дози іонізуючого випромінювання в агроєкосистемах України. Для досягнення цієї мети було проведено відбір венозної крові у свиней, які утримуються у господарствах із різним рівнем радіоекологічного навантаження, визначено основні гематологічні та імунологічні параметри периферичної крові, а також проаналізовано взаємозв'язок між величиною поглинутої дози й фагоцитарною активністю клітин крові з метою встановлення адаптаційних реакцій організму.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проводили протягом 2022–2024 рр. у межах агроєкосистеми Північного та Центрального Полісся України (Житомирська, Київська, Рівненська області). Ці території характеризуються різним рівнем техногенного забруднення радіонуклідами, зокрема ізотопом ^{137}Cs , який залишається одним із головних маркерів постчорнобильського радіоекологічного стану. Обробку даних, частину лабораторних досліджень проводили на кафедрі нормальної та патологічної морфології і фізіології факультету ветеринарної медицини і технологій у тваринництві Закладу вищої освіти «Подільський державний університет» та на базі приватної ветеринарної клініки «Vet Generation», м. Київ.

Для подальших досліджень відібрано три зони з різним рівнем радіаційного навантаження: I зона (контрольна) – 0,8 мГр/рік; II зона (умовно безпечна) – 1,2 мГр/рік; III зона (експериментальна) – 1,5 мГр/рік.

Радіоекологічне обстеження територій здійснювали за допомогою переносного дозиметра-радіометра СРП-68-01 (виробництва України) та гамма-спектрометра «Gamma M-1C» (НВП «Екоцентр», Київ). Потужність експозиційної дози вимірювали безпосередньо на пасовищах, у місцях розташування свиноферм і на прилеглих сільськогосподарських угіддях.

На основі результатів спектрометричного аналізу та розрахункових методик, викладених у ВП 13.73.13/12-00 «Оцінка доз опромінення сільськогосподарських тварин на території, забрудненій радіонуклідами», було визначено середньорічні поглинуті дози зовнішнього й внутрішнього опромінення тварин. Зазначені дози не перевищували встановлені допустимі рівні для сільськогосподарських територій відповідно до Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97).

У досліді використовували клінічно здорових свиней великої білої породи віком 5–6 місяців, середньою масою тіла 95 ± 6 кг, яких утримували в ідентичних умовах годівлі та утримання.

Тварини перебували у фермерських господарствах, що мали подібні технологічні умови, але відрізнялися рівнем радіоекологічного навантаження. Усі маніпуляції з тваринами проводили відповідно до вимог Європейської конвенції про захист хребетних тварин, що використовуються для експериментів та інших наукових цілей (Страсбург, 1986), а також Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження» (ред. 2021 р.).

Для оцінки впливу малих доз іонізуючого випромінювання відібрано:

1. у зоні 0,8 мГр/рік – 30 свиней (контроль) №
2. у зоні 1,2 мГр/рік – 25 свиней;
3. у зоні 1,5 мГр/рік – 22 свині.

Різниця за віком і масою тіла між групами статистично незначуща ($p > 0,05$), що забезпечує коректність порівняльного аналізу.

Проби венозної крові відбирали до 10:00, після 12-годинної годівельної паузи з яремної вени (v. jugularis externa) у вакуумні пробірки об'ємом 9 мл із літій-гепарином.

Під час визначення гематологічних показників досліджували: кількість формених елементів крові (еритроцитів, лейкоцитів) – визначали в камері Горяєва за загальноприйнятою методикою; концентрацію гемоглобіну – визначали колориметричним методом із використанням набору реагентів «Hemoglobin-olvex» (Ольвекс, Україна); швидкість осідання еритроцитів (ШОЕ) – визначали за методом Панченкова; гематокритне число – обчислювали мікроцентрифугуванням у капілярах за 12 000 об/хв протягом 5 хв.

Для контролю точності вимірювань застосовували автоматичний гематологічний аналізатор «Mindray BC-2800Vet».

Фагоцитарну активність лейкоцитів оцінювали *in vitro* за методикою із використанням латексних часток (5×10^8 частинок/мл). Мазок фіксували (зазвичай метанолом) і забарвлювали за Романовським – Гімзою. Оцінку

проводили за допомогою світлової мікроскопії (за загального збільшення 1000× із використанням імерсійної олії).

Для кожного зразка підраховували 100 фагоцитів і визначали: фагоцитарний показник (ФП) – частку лейкоцитів, що містили латексні частки (%); фагоцитарний індекс (ФІ) – середню кількість часток латексу, поглинутих одним фагоцитом.

Зразки плазми крові використовували для визначення: загального білка (метод Б'юрета); активності ферментів АЛТ, АСТ, лужної фосфатази; умісту глюкози (глюкозооксидазним методом). Ці показники розглядали як додаткові маркери метаболічної реакції організму на радіаційне навантаження.

Для оцінки внутрішнього опромінення тварин проводили вимірювання питомої активності радіонуклідів (^{137}Cs і ^{90}Sr) у зразках корму та ґрунту. Відбір зразків здійснювали за методикою ДСТУ ISO 18589-5:2021 «Вимірювання радіоактивності в навколишньому середовищі». Питомі активності визначали методом гамма-спектрометрії в посуді Марінеллі протягом 3600 с.

У середньому в зоні з дозою 1,5 мГр/рік активність ^{137}Cs у ґрунті становила $95,4 \pm 8,6$ Бк/кг, у зеленій масі кормів – $32,1 \pm 4,7$ Бк/кг, тоді як у контрольній зоні (0,8 мГр/рік) відповідні значення були $7,9 \pm 1,3$ Бк/кг і $2,1 \pm 0,4$ Бк/кг.

Результати обробляли методами варіаційної статистики з використанням програм Microsoft Excel 2019 і Statistica 10.0. Для кожного показника обчислювали середнє арифметичне значення (M), середнє квадратичне відхилення (SD), стандартну помилку (m) та коефіцієнт варіації (Cv).

Достовірність різниць між групами визначали за допомогою t-критерію Ст'юдента. Відмінності вважали статистично значущими за $p \leq 0,05$.

За результатами пішохідної гамма-зйомки середні значення потужності експозиційної дози на пасовищах у межах контрольної зони (0,8 мГр/рік) становили $0,12 \pm 0,03$ мкЗв/год, у зоні 1,2 мГр/рік – $0,21 \pm 0,05$ мкЗв/год, а на територіях із найбільшим рівнем навантаження (1,5 мГр/рік) – $0,28 \pm 0,06$ мкЗв/год.

Активність ^{137}Cs у ґрунті коливалася в межах 7,9–95,4 Бк/кг, що відповідає класифікації агроєкосистем із низьким і середнім рівнями техногенного радіоактивного забруднення. Установлено, що питомі активності ізотопів у рослинній масі пропорційно зростають до рівня ґрунтових значень, підтверджуючи стабільний механізм трофічного переносу радіонуклідів.

Усі свині мали задовільний загальний стан, активну поведінку, апетит збережений, температура тіла – $38,6 \pm 0,2^\circ\text{C}$, частота пульсу – 78 ± 6 уд./хв, частота дихання – 20 ± 4 /хв. Слизові оболонки чисті, рожеві; лімфатичні вузли не збільшені, підшкірна жирова клітковина розвинена помірно, що відповідає середній вгодованості (перша група за ДСТУ 4427:2005). Жодних клінічних ознак анемії, інтоксикації чи дерматологічних порушень не виявлено.

Як видно з табл. 1, у тварин, що перебували під впливом дози 1,5 мГр/рік, кількість лейкоцитів була достовірно вищою на 31% ($p < 0,01$), а еритроцитів – на 21% ($p < 0,05$) порівняно з контролем. Такі зміни можна розцінювати як компенсаторну реакцію системи кровотворення у відповідь на низькодозове хронічне опромінення, що стимулює проліферативну активність клітин кісткового мозку.

Таблиця 1. Гематологічні показники периферичної крові свиней за різних рівнів поглинутої дози іонізуючого випромінювання ($M \pm m$)

Показник	0,8 мГр/рік (n=30)	1,2 мГр/рік (n=25)	1,5 мГр/рік (n=22)
Лейкоцити, $\times 10^9/\text{л}$	$11,3 \pm 0,5$	$12,9 \pm 0,6^*$	$14,8 \pm 0,7^{**}$
Еритроцити, $\times 10^{12}/\text{л}$	$6,2 \pm 0,3$	$6,9 \pm 0,4$	$7,5 \pm 0,3^*$
Гемоглобін, г/л	$116,5 \pm 5,2$	$119,1 \pm 4,8$	$121,9 \pm 5,1$
Гемокрит, %	$36,2 \pm 1,8$	$37,5 \pm 1,7$	$38,9 \pm 2,0$
ШОЕ, мм/год	$0,9 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,2$	$1,4 \pm 0,2^*$

Примітка: * – $p < 0,05$; ** – $p < 0,01$ відносно контрольної групи (0,8 мГр/рік).

Підвищення ШОЕ на 55% у групі з максимальною дозою свідчить про активацію білкового обміну та зміни колоїдно-осмотичних властивостей плазми. Подібні тенденції раніше спостерігалися у великої рогатої худоби в умовах низьких доз [1; 5].

Таблиця 2. Біохімічні показники плазми крові свиней за різних рівнів радіаційного навантаження ($M \pm m$)

Показник	0,8 мГр/рік	1,2 мГр/рік	1,5 мГр/рік
Загальний білок, г/л	$68,4 \pm 3,2$	$71,1 \pm 2,8$	$74,8 \pm 2,6^*$
Глюкоза, ммоль/л	$4,1 \pm 0,2$	$4,4 \pm 0,2$	$4,7 \pm 0,3$
АЛТ, Од/л	$29,6 \pm 3,0$	$33,8 \pm 2,4$	$37,9 \pm 2,2^*$
АСТ, Од/л	$34,2 \pm 2,8$	$36,5 \pm 2,5$	$41,7 \pm 2,6^*$
Лужна фосфатаза, Од/л	$81,5 \pm 6,9$	$89,3 \pm 7,2$	$96,4 \pm 6,4$

*Примітка: – $p < 0,05$ порівнянні з контрольною групою.

Зростання концентрації загального білка (табл. 2) вказує на активацію синтетичних процесів у печінці, що є компенсаторною реакцією на вплив хронічного стресора. Підвищення активності ферментів АЛТ і АСТ, зафіксоване в експериментальній групі, може свідчити про помірне навантаження на гепатоцити, однак отримані значення залишалися в межах фізіологічних норм для свиней.

Фагоцитарну активність лейкоцитів (табл. 3) оцінювали за відсотком клітин, що поглинули латексні частинки (фагоцитарний показник, ФП), і середньою кількістю часток, поглинутих одним фагоцитом (фагоцитарний індекс, ФІ), також відомим як фагоцитарне число – середня кількість латексних часток, поглинутих одним

активним фагоцитом. ФІ слугує мірою інтенсивності фагоцитозу, відображаючи поглинальну спроможність окремої клітини. Ці показники дають змогу комплексно оцінити функціональний стан фагоцитарної ланки.

Таблиця 3. Фагоцитарна активність лейкоцитів периферичної крові свиней ($M \pm m$)

Показник	0,8 мГр/рік	1,2 мГр/рік	1,5 мГр/рік
Фагоцитарний показник (ФП), %	47,8 $\pm$ 2,9	38,6 $\pm$ 2,4*	30,9 $\pm$ 2,1**
Фагоцитарний індекс (ФІ), част./клітину	4,2 $\pm$ 0,3	3,1 $\pm$ 0,2*	2,6 $\pm$ 0,2**

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

У свиней, що перебували під впливом дози 1,5 мГр/рік, фагоцитарний показник зменшився на 35%, а фагоцитарний індекс – на 38% відносно контрольних значень.

Мікрофотографія (рис. 1) демонструє активний фагоцитоз нейтрофілом у крові опромінених тварин. У цитоплазмі нейтрофіла чітко візуалізуються поглинені елементи (забарвлені у фіолетовий колір), що інтерпретуються як фрагменти клітин або клітинні уламки (детрит), які утворилися внаслідок радіаційного пошкодження. Їхня присутність у цитоплазмі нейтрофіла є свідченням активного процесу фагоцитозу, спрямованого на очищення організму від уражених елементів. Цей процес є свідченням механізму санації організму, спрямованого на очищення від уражених структур. Навколо фагоцита розташовані еритроцити, що мають нормальну морфологію.

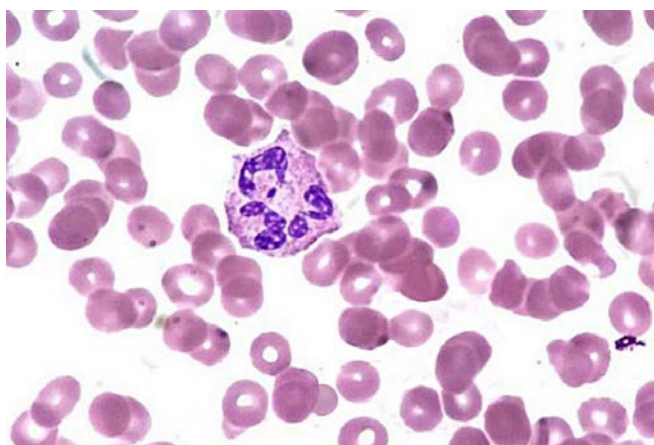


Рис. 1. Фагоцитоз клітинних уламків нейтрофілом після іонізуючого випромінювання
Фарбування за Романовським-Гімзою

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

Отримані дані свідчать, що малі дози іонізуючого випромінювання (до 2 мГр/рік) спричиняють у свиней подвійний біологічний ефект – стимулюючий щодо гемопоєзу та інгібуючий – щодо клітинного імунітету.

Стимуляція еритро- та лейкопоєзу, імовірно, пов'язана з адаптаційною реакцією організму, спрямованою на підтримання гомеостазу в умовах постійного слабкого впливу радіації. Підвищення кількості еритроцитів і рівня гемоглобіну може мати компенсаторно-антигіпоксичний характер, тоді як збільшення кількості лейкоцитів – результат мобілізації імунної системи.

З іншого боку, зниження фагоцитарної активності нейтрофілів свідчить про порушення клітинних механізмів неспецифічного імунного захисту. Це може бути наслідком оксидативного стресу та зниження енергетичного потенціалу фагоцитів.

Важливо відзначити, що всі зареєстровані зміни не виходили за межі фізіологічної адаптації. Таким чином, 1,5 мГр/рік можна розглядати як порогову дозу, за якої в організмі свиней починають проявлятися ранні ознаки імуномодулювальної дії хронічного опромінювання.

Висновки. У результаті проведених досліджень встановлено, що в умовах Полісся України середньорічна поглинута доза іонізуючого випромінювання на рівні 1,5 мГр/рік не спричиняє клінічно виражених патологічних змін у свиней великої білої породи, проте зумовлює статистично достовірні відхилення у показниках периферичної крові. Під впливом малої поглинутої дози відзначено підвищення кількості лейкоцитів і еритроцитів, що свідчить про стимулюючий ефект низькодозового хронічного опромінювання на функціональну активність органів кровотворення. Водночас спостерігалось зниження фагоцитарної активності лейкоцитів на 35–38% порівняно з контрольною групою, що вказує на певне пригнічення клітинної ланки неспецифічного імунітету. Отримані результати свідчать про те, що виявлені зміни мають компенсаторно-адаптаційний характер, типовий для фази хронічної радіаційної адаптації, і не супроводжуються вираженими порушеннями біохімічних параметрів крові. Таким чином, фагоцитарну активність нейтрофілів можна розглядати як чутливий біомаркер для раннього виявлення впливу малих доз іонізуючого випромінювання на організм свиней у природних радіоекологічних умовах.

Список використаних джерел

1. Лішчук 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. DOI: 10.31210/spi2024.27.02.13.
2. Azzam E.I., Jay-Gerin J.P., Pain D. Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*. 2012. Vol. 327. № 1–2. P. 48–60. DOI: 10.1016/j.canlet.2011.12.012.
3. 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106867.
4. 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. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2021.106603.
5. Hamada N., Sato T. The linear no-threshold model and hormesis: Current concepts in radiation protection. *International Journal of Radiation Biology*. 2022. Vol. 98. № 3. P. 293–305. DOI: 10.1080/09553002.2021.1959038.
6. ICRP (International Commission on Radiological Protection). Radiological protection of people and the environment (Publication 144). *Annals of the ICRP*. 2020. Vol. 49. № 4. P. 11–145. DOI: 10.1177/0146645320906277.
7. Khan A.U.H., Naranmandura H., Khan M.U. Effects of chronic low-dose internal radiation exposure on immune cell function in mammals. *International Journal of Molecular Sciences*. 2021. Vol. 22. № 14. P. 7303. DOI: 10.3390/ijms22147303.
8. 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>
9. 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. DOI: 10.1016/j.envint.2020.106212.
10. 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>

Lishchuk S. G.

Candidate of Agricultural Sciences,

*Associate Professor at the Department of Normal and Pathological Morphology and Physiology,
Higher educational institution «Podillia State University»*

Kamianets-Podilskyi, Ukraine

E-mail: itomlin@ukr.net

ORCID: 0000-0002-6294-5259

CHANGES IN PHAGOCYTIC ACTIVITY OF PIG BLOOD CELLS UNDER THE INFLUENCE OF LOW ABSORBED DOSE IONIZING RADIATION

Abstract

This study examines the effects of low absorbed doses of ionizing radiation on hematological and immunological parameters of pigs kept in the agricultural landscapes of Ukrainian Polissia. The persistent presence of radionuclides in the environment, particularly ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr, underscores the need for sensitive biomarkers of subclinical alterations in production animals. The study found that chronic exposure at approximately 1.5 mGy/year is associated with moderate but statistically significant hematological changes: increases in erythrocyte and leukocyte counts, interpreted as compensatory stimulation of hematopoiesis. At the same time, a marked reduction in neutrophil phagocytic activity (on average 35–40% relative to controls) was observed, indicating weakening of the cellular arm of innate immunity and possible depletion of phagocytic reserves under prolonged low-dose exposure. The concurrence of adaptive and dysfunction processes highlights the nonlinear nature of responses to low-dose ionizing radiation, including redox imbalance, modulation of antioxidant mechanisms, and subcellular alterations preceding clinical manifestations. Plasma biochemical indices remained largely within physiological limits, supporting an adaptive-compensatory interpretation of the observed shifts without overt systemic pathology. Practically, neutrophil phagocytic activity is proposed as an informative early biomarker for incorporating into ecological and veterinary-sanitary monitoring programs to assess risks and ensure safety in animal husbandry and food production. Further research and mitigation measures are warranted.

Key words: pigs, ionizing radiation, phagocytosis, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, peripheral blood, radioecology.

References

1. Lishchuk, S., & Savchuk, L. (2024). Radiatsiynnyi monitorynh ta porivnialnyi analiz morfoimunolohichnykh pokaznykiv krovi koriv pid chas tryvaloho vplyvu malykh doz radionuklidiv [Radiation monitoring and comparative analysis of morphoimmunological parameters of cow blood during prolonged exposure to low doses of radionuclides]. *Naukovyi prohres ta innovatsii*, 27(2), 78–83. <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.02.13> [in Ukrainian].
2. Azzam, E.I., Jay-Gerin, J.P., & Pain, D. (2012). Ionizing radiation-induced metabolic oxidative stress and prolonged cell injury. *Cancer Letters*, 327(1–2), 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.canlet.2011.12.012> [in English].
3. Baloh, M., Blazevic, D., Petrovic, S., & Fesenko, S. (2022). Evaluation of radiation exposure and transfer of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in pigs from contaminated areas. *Journal of Environmental Radioactivity*, 245, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106867> [in English].
4. Fesenko, S., Howard, B.J., & Balonov, M. (2021). Radioecological monitoring of agricultural animals after the Chernobyl accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 233, 106603. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106603> [in English].
5. Hamada, N., & Sato, T. (2022). The linear no-threshold model and hormesis: Current concepts in radiation protection. *International Journal of Radiation Biology*, 98(3), 293–305. <https://doi.org/10.1080/09553002.2021.1959038> [in English].

6. International Commission on Radiological Protection. (2020). *Radiological protection of people and the environment (Publication 144)*. Annals of the ICRP, 49(4), 11–145. <https://doi.org/10.1177/0146645320906277> [in English].
7. Khan, A.U.H., Naranmandura, H., & Khan, M.U. (2021). Effects of chronic low-dose internal radiation exposure on immune cell function in mammals. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(14), 7303. <https://doi.org/10.3390/ijms22147303> [in English].
8. Lishchuk S. (2022). Influence of ²³²Th and ⁹⁰Sr radionuclides on the state of natural animals resistance in radioactively contaminated territories of Ukraine. *Seria: Zeszyty Naukowe*, 87, 37–46. DOI: <https://doi.org/10.58246/hs54m847> [in English].
9. Lumniczky, K., Impens, N., Armengaud, J., & Candéas, S.M. (2021). Low dose ionizing radiation effects on the immune system. *Environmental International*, 149, 106212. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106212> [in English].
10. WorldHealthOrganization.(2023). *Ionizing radiation: health effects and protective measures*. WHO Press. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> [in English].

Отримано: 29.09.2025

Рекомендовано: 23.10.2025

Опубліковано: 16.12.2025