



Науковий вісник Львівського національного університету  
ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького.  
Серія: Ветеринарні науки

Scientific Messenger of Lviv National University  
of Veterinary Medicine and Biotechnologies.  
Series: Veterinary sciences

ISSN 2518–7554 print  
ISSN 2518–1327 online

doi: 10.32718/nvlvet11814  
<https://nvlvet.com.ua/index.php/journal>

UDC 619:636:616-0951.5

## Methodological approaches in the study of pathological changes during animal autopsies: a review of current practices

S. S. Zaika<sup>✉</sup>, S. V. Huralska, T. F. Kot, H. P. Hryshchuk, L. H. Yevtukh, I. M. Sokulskyi

Polissia National University, Zhytomyr, Ukraine

### Article info

Received 20.03.2025  
Received in revised form  
24.04.2025  
Accepted 25.04.2025

Polissia National University,  
Sary Boulevard, 7, Zhytomyr,  
10008, Ukraine.  
Tel.: +38-097-890-50-35  
E-mail: lana\_zaiika@ukr.net

**Zaika, S. S., Huralska, S. V., Kot, T. F., Hryshchuk, H. P., Yevtukh, L. H., & Sokulskyi, I. M. (2025). Hematological manifestations of the acute form of uncomplicated babesiosis in dogs. Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Veterinary sciences, 27(118), 102–109. doi: 10.32718/nvlvet11814**

The article presents a systematic review of modern methodological approaches to the study of pathological changes in animal postmortems. The focus is on the integration of morphological, histological, cytological, immunohistochemical, molecular, instrumental, and digital analyses, which together provide reliable verification of pathological processes, clarification of diagnoses, and an in-depth understanding of pathogenesis. Emphasis is placed on a multidisciplinary approach that combines veterinary pathology, molecular biology, bioinformatics, and artificial intelligence (AI) technologies. A critical analysis of the literature is conducted, highlighting the effectiveness and feasibility of using combined methods in veterinary postmortem diagnostics. The morphological approach, as a fundamental diagnostic tool, acquires new value when combined with highly sensitive laboratory and imaging methods. Histological and cytological studies allow for the identification of microscopic manifestations of pathology, while immunohistochemistry enables the detection of specific protein markers associated with infectious, neoplastic, and immune processes. Molecular pathology, including PCR, FISH, and NGS, provides detailed diagnostics and facilitates the detection of etiological agents. Special attention is given to instrumental methods (electron, fluorescence, and confocal microscopy; CT; MRI; spectroscopy), which significantly enhance the informativeness of the study, particularly when integrated with digital platforms and AI systems. Modern AI tools such as PathAI, QuPath, VetCT-AI, and DeepPath demonstrate high efficiency in the automated analysis of histological sections, identification of pathological patterns, lesion visualization, and disease course prediction. The advantages of a combined approach-integrating the results of morphological, molecular, and instrumental analyses into a unified diagnostic model – are discussed, with particular emphasis on its effective implementation in multidisciplinary collaboration. These approaches contribute to building an evidence base for veterinary medicine, standardizing postmortem diagnostics, and improving pathological research. Prospective directions for further research include the expansion of multi-omics approaches, the application of deep machine learning for digital image analysis, the creation of national and international databases of pathological animal data, and the development of unified diagnostic algorithms based on digital pathology and AI.

**Key words:** histology, immunohistochemistry, multidisciplinary approach, pathomorphology, pathosection, spectroscopy, artificial intelligence.

## Методологічні підходи у дослідженні патологічних змін при розтинах тварин: огляд сучасних практик

С. С. Зайка<sup>✉</sup>, С. В. Гуральська, Т. Ф. Кот, Г. П. Гришук, Л. Г. Євтух, І. М. Сокульський

Поліський національний університет, м. Житомир, Україна

У статті представлено системний огляд сучасних методологічних підходів до дослідження патологічних змін при патрозтиках тварин. У фокусі – інтеграція морфологічного, гістологічного, цитологічного, імуногістохімічного, молекулярного, інструментального та цифрового аналізу, що забезпечує достовірну верифікацію патологічного процесу, уточнення діагнозу та поглиблене

розуміння патогенезу. Акцентовано увагу на мультидисциплінарному підході, який поєднує ветеринарну патологію, молекулярну біологію, біоінформатику та технології штучного інтелекту (ШІ). Проведено критичний аналіз літературних джерел, які висвітлюють ефективність і доцільність застосування комбінованих методів у ветеринарній посмертній діагностиці. Морфологічний підхід як базовий інструмент діагностики набуває нової цінності у поєднанні з високочутливими лабораторними й візуалізаційними методами. Гістологічні та цитологічні дослідження дозволяють ідентифікувати мікроскопічні прояви патології, тоді як імуногістохімія дає змогу виявити специфічні білкові маркери, пов'язані з інфекційними, неопластичними та імунними процесами. Молекулярна патологія, включно з ПЛР, FISH, NGS, забезпечує глибоку діагностичну деталізацію та виявлення етіологічних агентів. Особливу увагу приділено інструментальним методам (електронній, флуоресцентній, конфокальній мікроскопії, КТ, МРТ, спектроскопії), які суттєво підвищують інформативність дослідження, особливо при інтеграції з цифровими платформами та системами ШІ. Сучасні AI-системи, такі як PathAI, QuPath, VetCT-AI, DeerPath, демонструють високі результати в автоматизованому аналізі гістологічних зрізів, пошуку патологічних патернів, візуалізації пошкоджень та прогнозуванні перебігу захворювання. Розглянуто переваги комбінованого підходу, що полягає в об'єднанні результатів морфологічного, молекулярного й інструментального аналізу в єдину діагностичну модель, що особливо ефективно реалізується в умовах мультидисциплінарної співпраці. Такі підходи сприяють формуванню доказової бази для ветеринарної медицини, стандартизації посмертної діагностики та вдосконаленню патологоанатомічних досліджень. Перспективами подальших досліджень визначено розширення мультиомних підходів, застосування глибокого машинного навчання для аналізу цифрових зображень, створення національних і міжнародних баз патологічних даних тварин та розробку уніфікованих діагностичних алгоритмів на основі цифрової патології та ШІ.

**Ключові слова:** гістологія, імуногістохімія, мультидисциплінарний підхід, патоморфологія, патрозтин, спектроскопія, штучний інтелект.

## Вступ

Патологоанатомічні розтини (некропсії) тварин є одним із ключових інструментів у ветеринарній медицині для з'ясування етіології, патогенезу, характеру та стадії патологічного процесу. Їх застосування має не лише діагностичне, а й епізоотологічне, профілактичне та наукове значення. В умовах постійного зростання захворюваності серед сільськогосподарських, лабораторних і домашніх тварин особливої актуальності набуває вдосконалення методології проведення патрозтину та інтерпретації отриманих результатів. Зважаючи на високу варіабельність патологічних змін, зумовлену видом тварини, тривалістю хвороби, інфекційним агентом або токсичною дією, виникає потреба у комплексному підході до дослідження патологічного матеріалу.

На сучасному етапі розвитку ветеринарної патології важливою тенденцією є інтеграція традиційних морфологічних методів з високотехнологічними інструментами, включаючи методи молекулярної біології, візуалізації, біоінформатики та штучного інтелекту. Швидкий розвиток цифрових технологій дозволяє автоматизувати процеси ідентифікації патологічних змін, стандартизувати результати аналізу, мінімізувати суб'єктивізм і підвищити точність діагностики. Особливо перспективним напрямом є використання алгоритмів глибинного навчання для аналізу гістологічних зрізів, що активно впроваджується як у медицині, так і у ветеринарії.

Незважаючи на велику кількість методів, що застосовуються в патоморфології, відсутній єдиний уніфікований підхід до вибору оптимального поєднання морфологічних, імуногістохімічних і цифрових методів у межах одного дослідження. Крім того, недостатньо висвітлено питання використання програмних засобів і ШІ для диференційної діагностики патологічних змін при патрозтинах тварин.

## Мета дослідження

Метою написання даної оглядової статті є систематизація сучасних методологічних підходів до дослідження патологічних змін при патрозтинах тварин,

аналіз переваг і обмежень кожного з них, а також висвітлення значення інноваційних цифрових технологій, зокрема програмного забезпечення та систем штучного інтелекту, у підвищенні точності ветеринарної діагностики. Стаття спрямована на формування цілісного уявлення про наявні практики, що можуть бути адаптовані або вдосконалені для потреб ветеринарної патоморфології, наукових досліджень та освітніх програм.

## Результати та їх обговорення

**Морфологічний підхід.** Морфологічний підхід до дослідження патологічних змін при патрозтинах тварин є фундаментальним напрямом у ветеринарній патології, що забезпечує первинну оцінку стану органів і тканин (Orakpoghenor & Terfa, 2024). Він включає макроскопічне та мікроскопічне дослідження, які дозволяють встановити характер, локалізацію, поширеність та стадію патологічного процесу (Terio et al., 2018; Pang et al., 2025). Морфологічні дослідження є незамінними при діагностиці запальних, дегенеративних, некротичних, новоутворюваних, дистрофічних і склеротичних змін, а також для ідентифікації паразитів, наслідків токсичних уражень, травм, тощо.

**Макроскопічне дослідження.** Макроскопічне (або патологоанатомічне) дослідження є першим етапом морфологічного аналізу. Воно передбачає зовнішній огляд трупа, виявлення порушень конфігурації, зміни кольору, консистенції та об'єму тканин, наявності ексудатів, крововиливів, пухлиноподібних утворень, тощо (Wenzlow et al., 2023). Важливими аспектами є опис послідовності ураження органів, симетрії патологічного процесу, співвідношення уражених структур до вікових або видоспецифічних норм (Figarella-Branger & Meyronet, 2012; Diab et al., 2017).

Наприклад, при серцевій недостатності у великої рогатої худоби часто виявляють застій крові в печінці, асцит, набряки підшкірної клітковини, гідроперикард – ці ознаки є діагностичними маркерами хронічної серцевої декомпенсації, які візуально фіксуються саме під час макроскопічної оцінки (Kumar et al., 2020).

**Мікроскопічне дослідження.** Мікроскопічний аналіз ґрунтується на дослідженні фіксованих, зали-

тих у парафін зрізів тканин, пофарбованих за загальноприйнятими або спеціальними методиками (гематоксилін та еозин, азан, ШИК-реакція, Ван Гізон, тощо). Гістологічний підхід дозволяє уточнити тип ураження (наприклад, серозне чи фібринозне запалення), визначити ступінь проліферації клітин, рівень некрозу, характер реакції судинної стінки, наявність міжклітинних відкладень, тощо (Avallone et al., 2021).

Гістологічна діагностика особливо важлива у випадках, коли макроскопічна картина є неспецифічною або відсутня. Наприклад, при вірусних інфекціях (хвороба Ауескі, чума м'ясоїдних, вірусна діарея Великої рогатої худоби) морфологічні зміни можуть бути мінімальними, але мікроскопія дозволяє виявити характерні цитопатичні ефекти – внутрішньоядерні включення, дегенерацію епітелію, лімфоцитарну інфільтрацію (Su et al., 2020; Wang & Pang, 2024).

**Верифікація діагнозу за допомогою морфологічних критеріїв.** У класичній патоморфології визначальним є формування діагнозу на основі комплексу морфологічних ознак. Так, описуючи процес як гнійне запалення, патологоанатом має підстави вказати: накопичення нейтрофілів, фагоцитоз бактерій, лізис тканини, наявність ексудату з домішками некротичного детриту. Наявність таких морфологічних ознак дозволяє встановити конкретну нозологію без додаткових методів або в комбінації з ними.

**Переваги та обмеження морфологічного підходу.** Перевагами морфологічного підходу є відносна простота, доступність, універсальність і висока інформативність у більшості випадків. Він не потребує складного обладнання на етапі макроскопії та є базовим методом при масових патологічних обстеженнях (зокрема в умовах епізоотичних спалахів).

Серед обмежень – суб'єктивність у трактуванні змін, залежність результату від кваліфікації дослідника, відсутність точного кількісного виміру процесів (наприклад, ступеня фіброзу або інфільтрації), складність диференціації злоякісних пухлин на ранніх стадіях без додаткових методів (імуногістохімія, ПЛР, цифрова морфометрія) (Litjens et al., 2017).

У зв'язку з цим усе частіше морфологічний підхід поєднується з сучасними технологіями, включно з автоматизованою цифровою мікроскопією, машинним навчанням та програмами морфометричного аналізу.

**Гістологічні та цитологічні методи.** Гістологічні та цитологічні дослідження є невід'ємною частиною морфологічної діагностики патологічних змін при патрозинах тварин. Ці методи забезпечують глибoku інтерпретацію клітинного та тканинного рівня патологічного процесу, дозволяють верифікувати діагноз, оцінити стадію ураження та визначити механізми розвитку захворювання. На відміну від макроскопічного аналізу, гісто- та цитологічні дослідження мають набагато вищу роздільну здатність та дають змогу виявити навіть мінімальні, ранні зміни, які не візуалізуються при патологоанатомічному огляді (Zachary, 2021).

**Гістологічні методи.** Гістологія ґрунтується на мікроскопічному аналізі тонких зрізів фіксованих і фарбованих тканин. Стандартним є забарвлення гематоксиліном та еозином (H&E), яке дозволяє оцінити

загальну архітектоніку тканин, тип клітинної інфільтрації, наявність некрозу, дегенерації, дисплазії, судинних порушень, проліферативних змін тощо. Спеціальні методи забарвлення – PAS, ШИК, трихром Массона, Судан III, Ван-Гізон, сріблення – використовуються для виявлення глікогену, колагенових волокон, жирових включень, базальних мембран і фібрилярних структур (Prophet et al., 1992; Benirschke et al., 2024).

За допомогою гістологічного аналізу можливо розпізнати морфологічні ознаки багатьох інфекційних, токсичних, імунних та неопластичних процесів. Наприклад, при сальмонельозі у свиней виявляють десквамацію епітелію кишечника, фібринозно-геморагічне запалення, тромбози капілярів і некроз крипт. У випадку злоякісної трансформації – атипію ядер, мітотичні фігури, інвазію в стромальні структури.

Особливе значення мають гістологічні методи у вивченні змін при малопомітних або прихованих патологічних процесах, зокрема при інтоксикаціях, ендокринних порушеннях або субклінічних інфекціях. Вони часто є єдиним джерелом доказів при судово-ветеринарній експертизі (Maxie, 2016).

**Цитологічні методи.** Цитологія є швидким, маловитратним і інформативним методом, що дозволяє оцінити морфологію окремих клітин або клітинних груп, отриманих шляхом зішкребів, мазків, відбитків або пункцій. Основним методом є мазок-відбиток, який забарвлюється за Романовським-Гімзою, Май-Грюнвальдом-Гімзою, Папаніколау або методами швидкої цитохімії (Cowell et al., 2020).

Цитологічне дослідження застосовується для оцінки ексудатів, біопатів, вмісту новоутворень, кіст, шкіри, лімфатичних вузлів. Визначають тип клітин, їх морфологію, наявність запальних або пухлинних елементів, паразитів, грибів, бактерій.

Цитологія має велике значення в експрес-діагностиці, зокрема у випадках підозри на новоутворення або гострі запалення. За її допомогою можна класифікувати пухлини (лімфома, карцинома, саркома), диференціювати реактивну та злоякісну дисплазію, визначити клітинний склад запальних інфільтрацій (Meuten, 2020).

**Інтеграція з цифровими технологіями.** Останніми роками гісто- та цитологічні методи активно інтегруються з цифровою патологією. Сканування гістологічних зрізів у формат Whole Slide Imaging (WSI) дозволяє проводити дистанційну оцінку, автоматизований аналіз морфометричних параметрів та застосування алгоритмів штучного інтелекту. Програмне забезпечення, таке як *QuPath*, *HALO AI*, *Aiforia*, використовується для ідентифікації патологічних осередків, підрахунку клітин, аналізу інтенсивності фарбування, тощо (Janin et al., 2012; Bankhead et al., 2017).

Цитологія також адаптована до цифрової оцінки – системи розпізнавання клітин (наприклад, *CellProfiler*, *DeepCell*, *Cytomine*) застосовуються для класифікації клітин за морфотипом, виявлення атипичних елементів або патологічних змін структури ядра (Greenwald et al., 2022).

**Значення в судово-ветеринарній практиці.** У судово-ветеринарній експертизі гістологія та цитологія мають доказове значення при розслідуванні причин смерті, зокрема у випадках хронічної інтоксикації, злоякісних пухлин, імунопатологій. Їх результати можуть бути вирішальними для встановлення чи спростування факту зловживання тваринами або недбалості під час утримання (Bueno et al., 2014).

**Імуногістохімія та молекулярна патологія.** У сучасній ветеринарній патології імуногістохімічні (ІГХ) та молекулярно-біологічні методи є ключовими для точної верифікації патологічного процесу, зокрема при неопластичних, інфекційних, імунозалежних і дегенеративних захворюваннях. Ці технології дозволяють доповнити традиційний морфологічний підхід, поглибити розуміння патогенезу та забезпечити точну диференціацію між подібними за морфологією станами (Maxie, 2016).

**Імуногістохімія.** Імуногістохімія полягає у виявленні специфічних антигенів у тканинах шляхом їх зв'язування з моноклональними або поліклональними антитілами, які позначені ферментними (пероксидаза) або флуоресцентними мітками. ІГХ дозволяє візуалізувати локалізацію білків (мембранних, цитоплазматичних, ядерних) у клітинах і тканинах, що є вирішальним у диференціації типу пухлин, оцінці проліферативної активності, виявленні інфекційних агентів (вірусів, бактерій, паразитів) і дослідженні процесів апоптозу або ангиогенезу (Ramos-Vara et al., 2014).

Приклади застосування ІГХ у ветеринарній патології:

- Диференціація пухлин: використання маркерів *cytokeratin*, *vimentin*, *CD3*, *CD79a* для ідентифікації епітеліальних, мезенхімальних та лімфоїдних новоутворень (Goldschmidt, 2021).
- Виявлення вірусів: наприклад, виявлення антигенів вірусу сказу, чуми м'ясоїдних, парвовірусів у мозку, кишечнику, лімфовузлах.
- Дослідження клітинної проліферації: використання маркера *Ki-67* як індикатора злоякісності або активності патологічного процесу (Gross et al., 2020).

Перевагою ІГХ є її здатність надати інформацію про функціональний стан клітин – тобто не лише візуалізувати структуру, а й показати активність клітинних білків. Однак метод потребує добре збережених зразків, стандартизованого протоколу фіксації та дорогих реагентів, що обмежує його рутинне використання у польових умовах (Webster et al., 2020).

**Молекулярна патологія.** Молекулярні методи – це сукупність технологій, які дозволяють досліджувати нуклеїнові кислоти (ДНК, РНК) у зразках тканин або біологічних рідин. Найчастіше застосовуються:

- Полімеразна ланцюгова реакція (ПЛР) – для виявлення специфічних послідовностей ДНК/РНК патогенів, онкогенів або мутантних генів.
- RT-PCR (зворотна транскрипція) – для детекції експресії генів.
- *In situ hybridization* (ISH) – для локалізації нуклеїнових кислот у гістологічних зрізах (Nuovo, 2020).

**Застосування молекулярної патології в дослідженні патрозтинів:**

- Виявлення мікроорганізмів: ПЛР дозволяє виявити ДНК вірусу лейкозу великої рогатої худоби, мікобактерій, хламідій, вірусів африканської чуми свиней навіть при відсутності виражених гістологічних змін.

- Генетичні зміни при новоутвореннях: мутації в онкогенах *TP53*, *BRAF*, *HER2* асоціюються зі злоякісною трансформацією у тварин, особливо собак і котів (Michaud et al., 2023).

- Мікробіом і транскриптоміка: за допомогою Next Generation Sequencing (NGS) можливо охарактеризувати мікробіоту органів, оцінити профіль експресії генів при інфекційних або метаболічних хворобах (Guardabassi et al., 2021).

**Інтеграція ІГХ та молекулярної діагностики.** Поєднання ІГХ і молекулярних методів забезпечує найвищий рівень точності діагностики. Наприклад, у випадку підозри на лімфому у собаки, гістологія показує лімфоїдну інфільтрацію, ІГХ диференціює Т- або В-клітинну лінію, а ПЛР виявляє клональність ТКР або IgH-рецепторів – що є вирішальним для встановлення точного типу пухлини та вибору тактики лікування (Valli et al., 2019).

**Програмне забезпечення та штучний інтелект.** Цифрові платформи, такі як *Aiforia*, *Visiopharm*, *PathAI*, активно інтегрують ІГХ-зображення з алгоритмами машинного навчання для автоматизованої класифікації зразків. Наприклад, AI здатен розпізнати і порахувати кількість *Ki-67*-позитивних клітин або оцінити експресію *HER2* за шкалою. У ветеринарній практиці ці технології вже використовуються для досліджень у онкопатології та при виявленні вірусних інфекцій (Campanella et al., 2019).

Отже, імуногістохімія та молекулярна патологія є основою сучасної діагностики складних патологічних процесів у тварин. Вони дозволяють поєднати структурний та функціональний підхід, і разом із морфологічними методами формують новий стандарт ветеринарної діагностики.

**Інструментальні методи: мікроскопія, візуалізація, спектроскопія.** Інструментальні методи дослідження є невід'ємною складовою діагностичного процесу в патологічній анатомії тварин. Вони дають змогу виявити зміни на мікро- та макрорівнях, візуалізувати внутрішні структури, аналізувати хімічний склад тканин і підвищити об'єктивність морфологічної діагностики. До основних методів належать мікроскопія (світлова, електронна), візуалізаційні методи (рентгенографія, КТ, МРТ, УЗД) та спектроскопія (інфрачервона, мас-спектрометрія, ядерний магнітний резонанс).

**Мікроскопія.** Мікроскопія, зокрема електронна мікроскопія (ЕМ), забезпечує високороздільну візуалізацію ультраструктур клітин і тканин. Це особливо важливо при вивченні вірусних інфекцій, дегенеративних змін у мітохондріях, лізосомах, клітинних мембранах. Так, ЕМ дозволяє диференціювати типи нерозу, розпізнавати вірусні частки (наприклад, у випадку сказу чи африканської чуми свиней) та вивчати

автофагосоми при нейродегенеративних хворобах (Zachary, 2021; Li et al., 2024).

**Світлова мікроскопія** з використанням спеціальних методів забарвлення (PAS, трихром, конго червоний, сріблення) є основною в рутинній діагностиці. Можливість цифрової мікроскопії дозволяє інтегрувати її в системи штучного інтелекту (ШІ), які автоматизують аналіз зображень. Наприклад, програми на основі нейронних мереж здатні виявляти мікроскопічні зміни при мікотоксикозах, паразитозах, гепатопатіях, патологіях зубів, тощо (Hung et al., 2020).

**Візуалізація.** Ветеринарна візуалізація охоплює низку неінвазивних методів:

- Ультразвукова діагностика (УЗД) – виявлення структурних змін у печінці, нирках, селезінці, виявлення абсцесів, новоутворень, інфарктів (Nyland & Mattoon, 2014);
- Комп'ютерна томографія (КТ) – дозволяє візуалізувати у трьох вимірах патологічні вогнища в головному мозку, кістках, легенях. Важлива у пост-мортальних розтинах (віртуальна аутопсія) (Aeffner et al., 2021);
- Магнітно-резонансна томографія (МРТ) – особливо інформативна для діагностики патології центральної нервової системи, пухлин м'яких тканин;
- Рентгенографія – основний метод для візуалізації змін у грудній і черевній порожнинах, кістковій тканині.

Цифрові візуалізаційні зображення можуть оброблятися ШІ для автоматичної сегментації органів, виявлення патологічних утворень. Системи на базі deep learning, такі як VetCT, вже використовуються для аналізу КТ і МРТ зображень у ветеринарії (VetCT Group, 2023).

**Спектроскопія.** Спектроскопічні методи дозволяють отримати спектральний підпис тканини, що є інформативним при біохімічній характеристиці патологічного процесу:

- ІЧ-спектроскопія використовується для аналізу змін у білках, ліпідах, нуклеїнових кислотах у тканинах при пухлинах і метаболічних порушеннях;
- Мас-спектрометрія (MS) дозволяє виявляти сліди токсичних речовин, продуктів метаболізму, біомаркерів (наприклад, β-амілоїд у нейродегенеративних процесах) (Theakstone et al., 2021);
- Ядерний магнітний резонанс (ЯМР) застосовується для метаболомного профілювання тканин – наприклад, при діагностиці печінкових патологій.

Штучний інтелект знаходить застосування й у спектроскопічному аналізі: машинне навчання дозволяє класифікувати спектри тканин (здорові/уражені) або виявляти патогномонічні біохімічні зміни. Наприклад, нейронні мережі, навчені на спектрах пухлин собак, здатні диференціювати доброякісні і злоякісні новоутворення з точністю понад 90 % (Zarella et al., 2019; Greenwald et al., 2022).

**Перспективи інтеграції.** Комбінування візуалізації, спектроскопії та ШІ дозволяє створити потужну мультиплатформену діагностичну систему. Наприклад, Raman-спектроскопія у поєднанні з deep learning використовується для аналізу мозкових пухлин у

собак, а віртуальна аутопсія на основі КТ/МРТ дає можливість проводити дослідження без інвазивного втручання, що особливо актуально в зоопатології та при розтинах тварин із зоозахисною цінністю (Bertolini et al., 2020; Amaral et al., 2024; Kehl et al., 2024).

**Комбіновані підходи та мультидисциплінарність.** Сучасні дослідження патологічних змін при патрозинах тварин потребують інтеграції декількох методологічних підходів – морфологічного, гістохімічного, молекулярного, інструментального – у рамках мультидисциплінарної взаємодії. Це дає змогу досягти більш повного, точного та об'єктивного аналізу патологічного процесу, що особливо актуально у ветеринарній патології, де важливо враховувати не лише морфологію, а й етіологію, патогенез, молекулярні маркери та патофізіологічний контекст (Ancheta et al., 2024).

**Суть комбінованого підходу.** Комбіновані підходи полягають у синхронному використанні кількох методів: наприклад, поєднання гістології з імуногістохімією, молекулярною патологією та візуалізаційними технологіями. Такий підхід дозволяє:

- Встановити причинно-наслідкові зв'язки між макро- і мікроскопічними змінами;
- Підтвердити ідентичність уражень, які візуалізуються *in vivo* (наприклад, при КТ або УЗД), за допомогою постморемних гістологічних і молекулярних досліджень;
- Верифікувати діагноз шляхом виявлення специфічних маркерів (наприклад, CD3+, CD20+, p53, GFAP, тощо);
- Підвищити чутливість та специфічність діагностики завдяки додатковим рівням аналізу – від морфології до генетичних змін (Litjens et al., 2017; Zuraw & Aeffner, 2021).

**Мультидисциплінарна співпраця.** У ветеринарній патології мультидисциплінарний підхід передбачає співпрацю:

- патологоанатомів
- молекулярних біологів
- ветеринарних лікарів-клініцистів
- лабораторних діагностів
- інженерів з обробки зображень та спеціалістів зі штучного інтелекту

Ця взаємодія дозволяє не лише оптимізувати алгоритм діагностики, а й створювати нові аналітичні інструменти, такі як мультиомні дослідження (multi-omics), віртуальна гістологія, AI-платформи для аналізу біоінформації. Наприклад, у дослідженні патології пухлин печінки у собак використовували комбінацію УЗД, біопсії, імуногістохімії та NGS (next-generation sequencing), що дало змогу встановити мутації в генах KRAS і TP53, асоційовані з агресивною поведінкою новоутворення (Oo et al., 2022; Aupperle-Lellbach et al., 2024).

**Роль штучного інтелекту в інтеграції підходів.** Штучний інтелект виступає як зв'язуюча ланка, що дозволяє об'єднати великі обсяги морфологічної, молекулярної та візуальної інформації. AI-системи:

- здійснюють автоматизований аналіз гістологічних препаратів та їх кореляцію з молекулярними профілями (Weinstein et al., 2004);
- сегментують структури на КТ/МРТ зображеннях і порівнюють їх з результатами аутопсії;
- підтримують прогностичне моделювання результатів захворювань на основі мультифакторного аналізу.

Інтегровані AI-системи, такі як PathAI, QuPath, DeepPath, VetCT-AI, уже активно застосовуються у ветеринарній патології, зокрема для вивчення онкопатологій, інфекційних хвороб та метаболічних уражень (Ameisen et al., 2012; Chu CP., 2024).

**Приклад застосування.** У дослідженні патологій дихальної системи великої рогатої худоби, що викликаються вірусом IBR та бактерійною мікрофлорою, використовували:

1. Патоморфологічний розтин – виявлено катарально-геморагічне ураження трахеї;
2. Імуногістохімію – виявлено антиген вірусу герпесу у клітинах епітелію;
3. ПЛР – підтверджено наявність генетичного матеріалу IBR;
4. Цифрову мікроскопію з AI-аналізом – оцінено вираженість запалення та некрозу. Цей підхід забезпечив точну диференційну діагностику, що неможливо було зробити за допомогою одного методу (Bertram & Klopffleisch, 2017; Piccione et al., 2025).

### Висновки

Методологічні підходи до дослідження патологічних змін при розтинах тварин еволюціонували від класичної морфології до високотехнологічної мультидисциплінарної діагностики. Сучасна ветеринарна патологія ґрунтується на комплексному використанні морфологічних, гістологічних, імуногістохімічних, молекулярно-генетичних, інструментальних та цифрових методів, які дають змогу досліджувати патологічні зміни на різних рівнях організації тканин – від макро- до нанорівня.

Інтеграція штучного інтелекту (ШІ) в аналіз мікроскопічних зображень, візуалізаційних досліджень і спектроскопічних даних значно підвищує точність, об'єктивність та відтворюваність діагностики. Це відкриває нові горизонти у вивченні складних або ранніх форм патологій, дозволяє встановлювати молекулярні маркери ушкоджень, автоматизувати диференційну діагностику та прогнозувати перебіг хвороб.

Комбіновані підходи з урахуванням даних з різних джерел (multi-omics, віртуальна аутопсія, NGS, цифрова гістологія) забезпечують цілісне уявлення про патологічний процес і є основою доказової ветеринарної медицини.

*Перспективи подальших досліджень:*

1. Розвиток мультиомних досліджень (геноміка, транскриптоміка, протеоміка, метаболоміка) у поєднанні з морфологічними методами для розкриття механізмів патогенезу хвороб тварин.
2. Впровадження глибокого машинного навчання для автоматизованого розпізнавання патологічних

змін на цифрових гістологічних та візуалізаційних зображеннях.

3. Розробка баз даних патологічних зображень для навчання ШІ-моделей та стандартизації діагностики у ветеринарії.

4. Застосування високочутливих методів *in situ* гібридизації та цифрової ПЛР для виявлення вірусів, бактерій, паразитів у тканинах тварин.

5. Міждисциплінарна інтеграція досліджень (патологія – клініка – генетика – інформатика) у межах One Health та підходу до зоонозних інфекцій.

У подальшому важливим напрямом стане формування глобального консенсусу щодо стандартизації протоколів патоморфологічних досліджень, що включають ШІ та молекулярні технології, з метою підвищення діагностичної точності, швидкості і біоетичності у ветеринарній практиці.

### Відомості про конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів.

### References

- Aeffner, F., Sing, T., & Turner, O. C. (2021). Whole-slide imaging, tissue image analysis, and artificial intelligence: An updated introduction and review. *Toxicologic Pathology*, 49(4), 705–708. DOI: 10.1177/0192623321993756.
- Amaral, C. I., Langohr, I. M., Giarretta, P. R., & Ecco, R. (2024). Digital pathology and artificial intelligence in veterinary medicine. *Brazilian Journal of Veterinary Pathology*, 17(3), 147–151. DOI: 10.24070/bjvp.1983-0246.v17i3p147-151.
- Ameisen, D., Le Naour, G., & Daniel, C. (2012). Technologie des lames virtuelles - De la numérisation à la mise en ligne [Whole slide imaging technology: from digitization to online applications]. *Medecine sciences: M/S*, 28(11), 977–982. DOI: 10.1051/medsci/20122811017.
- Ancheta, K., Le Calvez, S., & Williams, J. (2024). The digital revolution in veterinary pathology. *Journal of Comparative Pathology*, 214, 19–31. DOI: 10.1016/j.jcpa.2024.08.001.
- Avallone, G., Rasotto, R., Chambers, J. K., Miller, A. D., Behling-Kelly, E., Monti, P., Berlato, D., Valenti, P., & Roccabianca, P. (2021). Review of Histological Grading Systems in Veterinary Medicine. *Veterinary Pathology*, 58(1), 42–58. DOI: 10.1177/0300985821999831.
- Aupperle-Lellbach, H., Kehl, A., de Brot, S., & van der Weyden, L. (2024). Clinical Use of Molecular Biomarkers in Canine and Feline Oncology: Current and Future. *Veterinary Sciences*, 11(5), 199. DOI: 10.3390/vetsci11050199.
- Bankhead, P., Loughrey, M. B., Fernández, J. A., Dombrowski, Y., McArt, D. G., Dunne, P. D., McQuaid, S., Gray, R. T., Murray, L. J., Coleman, H. G., James, J. A., Salto-Tellez, M., & Hamilton, P. W. (2017). QuPath: Open source software for digital pathology image analysis. *Scientific reports*, 7(1), 16878. DOI: 10.1038/s41598-017-17204-5.
- Benirschke, R. C., Wodskow, J., Prasai, K., Freeman, A., Lee, J. M., & Groth, J. (2024). Assessment of a large

- language model's utility in helping pathology professionals answer general knowledge pathology questions. *American journal of clinical pathology*, 161(1), 42–48. DOI: 10.1093/ajcp/aqad106.
- Bertram, C. A., & Klopfleisch, R. (2017). The Pathologist 2.0: An Update on Digital Pathology in Veterinary Medicine. *Veterinary pathology*, 54(5), 756–766. DOI: 10.1177/0300985817709888.
- Bueno, L. H. P., da Silva, R. H. A., Azenha, A. V., de Souza Dias, M. C., & De Martinis, B. S. (2014). Oral fluid as an alternative matrix to determine ethanol for forensic purposes. *Forensic Science International*, 242, 117–122. DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.06.024.
- Campanella, G., Hanna, M. G., Geneslaw, L., Mirafior, A., Werneck Krauss Silva, V., Busam, K. J., Brogi, E., Reuter, V. E., Klimstra, D. S., & Fuchs, T. J. (2019). Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images. *Nature medicine*, 25(8), 1301–1309. DOI: 10.1038/s41591-019-0508-1.
- Cowell, R. L., Tyler, R. D., & Meinkoth, J. H. (2020). *Diagnostic Cytology and Hematology of the Dog and Cat*. 5th ed. Mosby. URL: <https://www.us.elsevierhealth.com/cowell-and-tylers-diagnostic-cytology-and-hematology-of-the-dog-and-cat-9780323533140.html>.
- Chu, C. P. (2024) ChatGPT in veterinary medicine: a practical guidance of generative artificial intelligence in clinics, education, and research. *Front. Vet. Sci.*, 11, 1395934. DOI: 10.3389/fvets.2024.1395934.
- Figarella-Branger, D., & Meyronet, D. (2012). Lames virtuelles, oui, pathologistes virtuels, non [Virtual slides, yes, virtual pathologists, no!]. *Medecine sciences: M/S*, 28(11), 907–908. DOI: 10.1051/medsci/20122811001.
- Goldschmidt, M. H., & Goldschmidt, K. H. (2021). *Histological Classification of Tumors of Domestic Animals*. Armed Forces Institute of Pathology. URL: <https://davisthompsonfoundation.org/bookstore/histological-classification-of-hematopoietic-tumors-of-domestic-animals>.
- Greenwald, N. F., Miller, G., Moen, E., Kong, A., Kagel, A., Dougherty, T., Fullaway, C. C., McIntosh, B. J., Leow, K. X., Schwartz, M. S., Pavelchek, C., Cui, S., Camplisson, I., Bar-Tal, O., Singh, J., Fong, M., Chaudhry, G., Abraham, Z., Moseley, J., Warshawsky, S., ... Van Valen, D. (2022). Whole-cell segmentation of tissue images with human-level performance using large-scale data annotation and deep learning. *Nature biotechnology*, 40(4), 555–565. DOI: 10.1038/s41587-021-01094-0.
- Gross, T. L., et al. (2020). *Skin Diseases of the Dog and Cat: Clinical and Histopathologic Diagnosis*, 2nd ed. Wiley. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Skin+Diseases+of+the+Dog+and+Cat%3A+Clinical+and+Histopathologic+Diagnosis%2C+2nd+Edition-p-9780632064526>.
- Guardabassi, L., et al. (2021). *Pet Microbiomes: Methods and Protocols*. Humana Press. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-0716-1314-3>.
- Diab, S. S., Poppenga, R., & Uzal, F. A. (2017). Sudden death in racehorses: postmortem examination protocol. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation*, 29(4), 442–449. DOI: 10.1177/1040638716687004.
- Hung, K., Montalvao, C., Tanaka, R., Kawai, T., & Bornstein, M. M. (2020). The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: A systematic review. *Dento maxillofacial radiology*, 49(1), 20190107. DOI: 10.1259/dmfr.20190107.
- Janin, A., Legrès, L., Leboeuf, C., Scoazec, J. Y., & Bertheau, P. (2012). Les lames virtuelles en recherche expérimentale et en recherche clinique [Virtual slides in fundamental and clinical research]. *Medecine sciences: M/S*, 28(11), 990–992. DOI: 10.1051/medsci/20122811020.
- Kehl, A., Aupperle-Lellbach, H., de Brot, S., & van der Weyden, L. (2024). Review of Molecular Technologies for Investigating Canine Cancer. *Animals: an open access journal from MDPI*, 14(5), 769. DOI: 10.3390/ani14050769.
- Kumar, V., Abbas, A., & Aster, J. (2020). *Robbins and Cotran Pathologic Basis of Disease* (10th ed.). Elsevier. DOI: 10.4236/oje.2024.1410043.
- Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., Setio, A. A. A., Ciompi, F., Ghafoorian, M., van der Laak, J. A. W. M., van Ginneken, B., & Sánchez, C. I. (2017). A survey on deep learning in medical image analysis. *Medical image analysis*, 42, 60–88. DOI: 10.1016/j.media.2017.07.005.
- Li, Y., Pillar, N., Li, J., Liu, T., Wu, D., Sun, S., Ma, G., de Haan, K., Huang, L., Zhang, Y., Hamidi, S., Urisman, A., Keidar Haran, T., Wallace, W. D., Zuckerman, J. E., & Ozcan, A. (2024). Virtual histological staining of unlabeled autopsy tissue. *Nature communications*, 15(1), 1684. DOI: 10.1038/s41467-024-46077-2.
- Maxie, M. G. (2016). *Jubb, Kennedy & Palmer's Pathology of Domestic Animals*. 6th ed. Elsevier. URL: <https://evolve.elsevier.com/cs/product/9780702053177?role=student>.
- McGenity, C., Clarke, E. L., Jennings, C., et al. (2023). Artificial intelligence in digital pathology: A diagnostic test accuracy systematic review and meta-analysis. *Digit. Med.*, 7, 114. DOI: 10.48550/arXiv.2306.07999.
- Meuten, D. J. (2020). *Tumors in Domestic Animals*. 5th ed. Wiley-Blackwell. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Tumors+in+Domestic+Animals%2C+5th+Edition-p-9781119181200>.
- Michaud, K., Jacobsen, C., Basso, C., Banner, J., Blokker, B. M., de Boer, H. H., Dedouit, F., et al. (2023). Application of postmortem imaging modalities in cases of sudden death due to cardiovascular diseases-current achievements and limitations from a pathology perspective : Endorsed by the Association for European Cardiovascular Pathology and by the International Society of Forensic Radiology and Imaging. *Virchows Archiv: an international journal of pathology*, 482(2), 385–406. DOI: 10.1007/s00428-022-03458-6.
- Nuovo, G. J. (2020). *In Situ Molecular Pathology and Co-expression Analyses*. Academic Press. URL: <https://shop.elsevier.com/books/in-situ-molecular->

- pathology-and-co-expression-analyses/nuovo/978-0-12-820653-9.
- Nyland, T. G., & Mattoon, J. S. (2014). *Small Animal Diagnostic Ultrasound*, 3rd Ed. Elsevier. URL: <https://shop.elsevier.com/books/small-animal-diagnostic-ultrasound/mattoon/978-1-4160-4867-1>.
- Orakpoghenor, O., & Terfa, A. (2024). Necropsy as an Important Diagnostic Step in Veterinary Pathology: The Past, Present, and Future Perspectives. *Research in Veterinary Science and Medicine*, 4, 1–4. DOI: 10.25259/RVSM\_6\_2024.
- Oo, T., Sasaki, N., Ikenaka, Y., Ichise, T., Nagata, N., Yokoyama, N., Sasaoka, K., Morishita, K., Nakamura, K., & Takiguchi, M. (2022). Serum steroid profiling of hepatocellular carcinoma associated with hyperadrenocorticism in dogs: A preliminary study. *Frontiers in veterinary science*, 9, 1014792. DOI: 10.3389/fvets.2022.1014792.
- Pang, M., Roy, T. K., Wu, X., & Tan, K. (2025). Cello-Type: a unified model for segmentation and classification of tissue images. *Nature methods*, 22(2), 348–357. DOI: 10.1038/s41592-024-02513-1.
- Piccione, J., Anderson, S. F., Neal, S. V., & Varvil, M. S. (2025). Digital pathology in veterinary clinical pathology: A review. *Veterinary pathology*, 3009858251334340. Advance online publication. DOI: 10.1177/03009858251334340.
- Prophet, E. B., Mills, B., Arrington, J. B., & Sobin, L. H. (1992). *Laboratory Methods in Histotechnology*. Washington, D.C.: American Registry of Pathology. URL: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=mdp.39015029715979>.
- Ramos-Vara, J. A., Webster, J. D., DuSold, D., & Miller, M. A. (2014). Immunohistochemical evaluation of the effects of paraffin section storage on biomarker stability. *Veterinary pathology*, 51(1), 102–109. DOI: 10.1177/0300985813476067.
- Su, M., Chen, Y., Qi, S., Shi, D., Feng, L., & Sun, D. (2020). A Mini-Review on Cell Cycle Regulation of Coronavirus Infection. *Frontiers in Veterinary Science*, 7, 586826. DOI: 10.3389/fvets.2020.586826.
- Theakstone, A. G., Rinaldi, C., Butler, H. J., et al. (2021). Fourier-transform infrared spectroscopy of biofluids: A practical approach. *Translational Biophotonics*, 3, e202000025. DOI: 10.1002/tbio.202000025.
- Terio, K. A., McAloose, D., & St. Leger, J. (Eds.) (2018). *Pathology of Wildlife and Zoo Animals*. Academic Press (Elsevier). URL: <https://shop.elsevier.com/books/pathology-of-wildlife-and-zoo-animals/terio/978-0-12-805306-5>.
- Valli, V. E. O., et al. (2019). *Hematopoietic Tumors of Domestic Animals*. 2nd ed. Wiley-Blackwell. URL: <https://www.wiley.com/en-us/Hematopoietic+Tumors+of+Domestic+Animals%2C+2nd+Edition-p-9781119125716>.
- VetCT Group (2023). AI in veterinary radiology. URL: <https://www.vet-ct.com>.
- Wang, Y., & Pang, F. (2024). Diagnosis of bovine viral diarrhea virus: an overview of currently available methods. *Frontiers in microbiology*, 15, 1370050. DOI: 10.3389/fmicb.2024.1370050.
- Webster, J. D., Solon, M., & Gibson-Corley, K. N. (2020). Validating Immunohistochemistry Assay Specificity in Investigative Studies: Considerations for a Weight of Evidence Approach. *Veterinary Pathology*, 58(5), 829–840. DOI: 10.1177/0300985820960132.
- Weinstein, R. S., Descour, M. R., Liang, C., Barker, G., Scott, K. M., Richter, L., Krupinski, E. A., et al. (2004). An array microscope for ultrarapid virtual slide processing and telepathology. Design, fabrication, and validation study. *Human pathology*, 35(11), 1303–1314. DOI: 10.1016/j.humpath.2004.09.002.
- Wenzlow, N., Mills, D., Byrd, J., Warren, M., & Long, M. T. (2023). Review of the current and potential use of biological and molecular methods for the estimation of the postmortem interval in animals and humans. *Journal of veterinary diagnostic investigation: official publication of the American Association of Veterinary Laboratory Diagnosticians, Inc*, 35(2), 97–108. DOI: 10.1177/10406387231153930.
- Zachary, J. F. (2021). *Pathologic Basis of Veterinary Disease*, 7th Ed. Elsevier. URL: <https://shop.elsevier.com/books/pathologic-basis-of-veterinary-disease/zachary/978-0-323-71313-9>.
- Zarella, M. D., Bowman, D., Aeffner, F., Farahani, N., Xthona, A., Absar, S. F., Parwani, A., Bui, M., & Hartman, D. J. (2019). A Practical Guide to Whole Slide Imaging: A White Paper From the Digital Pathology Association. *Archives of pathology & laboratory medicine*, 143(2), 222–234. DOI: 10.5858/arpa.2018-0343-RA.
- Zuraw, A., & Aeffner, F. (2021) Whole-slide imaging, tissue image analysis, and artificial intelligence in veterinary pathology: An updated introduction and review. *Veterinary Pathology*, 59(1), 6–25. DOI: 10.1177/03009858211040484.