

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Бабенка Віталія Олеговича

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему «Технологія ієрархічної класифікації в задачах діагностики патологій за медичними зображеннями різних модальностей»,
(назва дисертації)

подану на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 12 – Інформаційні технології
(код та назва)

за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки
(код і найменування спеціальності відповідно до Переліку галузей знань і спеціальностей, за якими здійснюється підготовка здобувачів вищої освіти)

Актуальність теми дисертації

Завдання аналізу цифрових медичних зображень мають важливе значення для вирішення складних класифікації та прогнозування, зокрема, в автоматизованій діагностиці медичних патологій. Особливо актуальним є завдання підвищення точності й надійності алгоритмів обробки медичних зображень, для яких характерні значна варіабельність зображень залежно від інструментарію та умов отримання, обмежений обсяг анотованих вибірок, наявність шумів і артефактів, а також дисбаланс класів діагнозів.

Такі прикладні задачі, як неінвазійна діагностика стадій фіброзу печінки за даними ультразвукових досліджень (УЗД) та COVID-асоційованих легеневих патологій за даними комп'ютерної томографії (КТ), вимагають розроблення нових підходів до формування найбільш інформативних ознак і створення алгоритмів, здатних до ефективного узагальнення на обмежених та незбалансованих вибірках.

У цьому контексті дисертаційна робота Бабенка В.О., спрямована на розроблення та перевірку універсальної технології аналізу цифрових медичних зображень, що поєднує нові методи формування інформативних ознак на основі розширеного текстурного аналізу з інноваційною технологією ієрархічної класифікації, є актуальною. Запропонований модифікований алгоритм «випадковий ліс дерев оптимальної складності» (ВЛДОС), що інтегрує принципи МГУА, генетичних алгоритмів та методу аналізу ієрархій, має потенціал для підвищення точності, стійкості та узагальнювальної здатності побудованих моделей при роботі з гетерогенними медичними даними.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх вірогідності та новизни

Наукова новизна результатів виконаного дослідження полягає в такому:

1. Отримала подальший розвиток методологія формування та вибору сукупності інформативних ознак цифрових зображень у вигляді комплексної методики стандартизації та конструювання розширеної множини ознак, що характеризують текстурні, гістограмні, багатомасштабні та інші особливості зображень, з подальшою селекцією підмножини найбільш інформативних ознак за допомогою кореляційного відбору за критерієм Спірмена для забезпечення ефективності подальшого аналізу та класифікації.

2. Вперше розроблено технологію класифікації патологій за множиною медичних зображень об'єкта дослідження, що передбачає обчислення розподілу ймовірностей для бінарних комбінацій класів шляхом голосування деревами рішень для кожного зображення за вектором відібраних ознак, з подальшим визначенням приналежності до класу за допомогою ансамблевих методів. Остаточне визначення класу патології для об'єкта відбувається на основі множини всіх визначених класів діагностичних показників, що підвищує точність діагностування порівняно з класифікацією за окремими знімками.

3. Вдосконалено метод випадкового лісу в формі методу ВЛДОС за допомогою інтеграції трьох ключових підходів:

- побудова мінімальної кількості дерев рішень на основі принципів МГУА, що сприяє уникненню перенавчання і підвищенню узагальнювальної здатності;
- визначення оптимального набору ознак для кожного дерева на основі генетичних алгоритмів за критерієм кореляції Меттьюза, що забезпечує індивідуалізацію та підвищення ефективності кожного компонента ансамблю;
- визначення ваг дерев методом аналізу ієрархій Сааті, що дозволяє формувати агреговані результати за допомогою зваженого голосування, підвищуючи загальну точність класифікації за вектором визначених ознак.

Вірогідність наукових результатів забезпечується:

- репрезентативною експериментальною базою: дослідження проведено на значному обсязі реальних клінічних даних – 1059 ультразвукових зображень для задачі стадіювання фіброзу печінки та 2355 сегментованих масок зрізів комп'ютерної томографії (загалом з 19321 зрізів від 48 пацієнтів) для ідентифікації COVID-асоційованих патологій легень;
- коректним застосуванням сучасних методів дослідження: апробовані методи попередньої обробки зображень, відомі методи текстурного аналізу для формування ознак, ансамблеві алгоритми машинного навчання (випадковий ліс, XGBoost, LightGBM) та розроблений модифікований метод ВЛДОС;
- ретельним плануванням експериментів: поділ даних на навчальну, контрольну та екзаменаційну вибірки з використанням стратифікованої групової перехресної перевірки для налаштування гіперпараметрів моделей, що мінімізує ризик перенавчання та забезпечує об'єктивність оцінки;

- статистичною обробкою результатів: для оцінки значущості отриманих показників якості класифікації (правильність, чутливість, специфічність, точність, F-міра) розраховано 95% довірчі інтервали методом бутстрепа;

- порівняльним аналізом: ефективність розробленої технології та методу ВЛДОС продемонстровано шляхом порівняння з відомими ансамблевими методами машинного навчання;

- практичною апробацією та впровадженнями: результати роботи впроваджено в практику чотирьох провідних медичних та наукових установ України (ДУ «Інститут ядерної медицини та променевої діагностики НАМН України», ДУ «Інститут педіатрії, акушерства і гінекології імені академіка О.М. Лук'янової НАМН України», ДУ «Національний науковий центр фтизіатрії, пульмонології та алергології ім. Ф.Г. Яновського НАМН України», Інститут інформаційних технологій та систем НАН України) протягом 2022-2025 років.

Обґрунтованість наукових результатів підтверджується:

- теоретичним підґрунтям: розроблена технологія базується на теорії розпізнавання образів, машинного навчання, індуктивного моделювання, генетичних алгоритмів, методу аналізу ієрархій та теорії обробки зображень;

- логікою дослідження: в роботі послідовно вирішуються завдання аналізу предметної галузі та наявних методів, розроблення нових підходів, їх експериментальної перевірки і формулювання висновків і рекомендацій;

- адекватністю використаних методів дослідження: їх вибір відповідає поставленим задачам та специфіці оброблюваних даних;

- кількісними показниками: отримано конкретні значення показників якості класифікації (правильність для фіброзу печінки – 67%, для COVID-патологій легень – 84%; F-міра відповідно 0.68 та 0.84 на екзаменаційних вибірках), які демонструють ефективність запропонованої технології;

- відтворюваністю результатів: детальний опис експериментальних умов та використаних алгоритмів дозволяє відтворити дослідження.

Отже, поставлене в дисертаційній роботі наукове завдання виконано, здобувач повною мірою оволодів методологією наукової діяльності.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Бабенка В.О. повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 122 – Комп'ютерні науки та напрямкам досліджень відповідно до освітньої програми «Комп'ютерні науки».

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям «медична діагностика за зображеннями».

Звіт за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові збіги свідчить, що дисертація Бабенка Віталія Олеговича є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідні джерела.

Мова і стиль викладення результатів

Дисертаційна робота написана українською мовою, стиль викладення – науковий, що відповідає вимогам до кваліфікаційних праць. Матеріал викладено послідовно та логічно, починаючи від постановки проблеми, огляду наявних методів, розроблення власних підходів, їх експериментальної перевірки та завершуючи аналізом результатів і формулюванням висновків.

Використана термінологія є загальноприйнятою в галузях комп'ютерних наук, машинного навчання, обробки зображень та медичної інформатики. Автор володіє спеціалізованою лексиною, чітко формулюючи думки. Структура роботи є стандартною для дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку літератури та додатків. Загальний обсяг дисертації 155 сторінок.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дослідження і важливість розроблення нових методів аналізу медичних зображень для підвищення точності діагностики. Сформульовано мету і завдання роботи, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження. Наведено зв'язок роботи з науковими темами. Вказано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, наведено дані про їх апробацію та впровадження.

У *першому* розділі «Огляд методів цифрової обробки та аналізу зображень» проведено аналіз сучасного стану проблеми. Розглянуто основні властивості цифрових зображень, зокрема просторову та колірну роздільну здатність, динамічний діапазон, формати зберігання. Детально проаналізовано методи текстурного аналізу, включаючи статистичні, спектральні та фрактальні, та їх застосування в різних галузях, зокрема в медицині. Висвітлено синергію текстурного аналізу з ансамблевими методами машинного навчання та глибокого навчання. Розглянуто сучасні підходи до мультикласової класифікації зображень, включаючи згорткові нейронні мережі (CNN) та трансформери. Проаналізовано обмеження наявних методів, такі як чутливість до шумів, вимоги до обсягу даних та інтерпретованість результатів. На основі виконаного аналізу сформульовано проблеми, що потребують вирішення, та обґрунтовано вибір напряму дослідження для розроблення власної технології.

У *другому* розділі «Послідовність формування множини інформативних ознак цифрових зображень» детально описано етап селекції множини інформативних ознак. Розглянуто методи гістограмної обробки як засоби

стандартизації та покращення контрастності зображень. Представлено спектр методів конструювання дескрипторів зображення, що охоплює: текстурні ознаки (статистики першого порядку, матриця суміжності рівнів сірого, матриця різниці відтінків сірого, метод енергії текстури Лоу, фрактальний аналіз тощо); ознаки на основі гістограм; багатомасштабні ознаки, отримані за допомогою вейвлет-перетворень; ознаки, виділені за допомогою згорткової нейронної мережі ResNet-50. Описано методику селекції найбільш інформативних ознак на основі кореляційного аналізу (з використанням коефіцієнта Спірмена) та стратегій усунення мультиколінеарності.

У *третьому* розділі «Розроблення методик для класифікації цифрових зображень» подано авторські розробки в галузі алгоритмів машинного навчання. Детально описано розроблення модифікованої версії методу випадкового лісу – ВЛДОС. Це охоплює: побудови дерева прийняття рішень з використанням принципів МГУА та коефіцієнта кореляції Меттьюза як критерію розбиття вузлів; оптимізацію набору ознак для кожного дерева за допомогою генетичного алгоритму; застосування аналізу ієрархій Сааті для зваженого голосування дерев ансамблю. Наведено порівняння ВЛДОС з ансамблевими методами випадковий ліс, XGBoost, LightGBM. Описано технологію ієрархічної класифікації для мультикласових задач з трьох етапів: побудова групових класифікаторів; мультикласифікація на рівні зразків (окремих зображень) за допомогою мета-класифікатора; та мультикласифікація на рівні об'єктів (пацієнтів) шляхом агрегації результатів. Обговорюються переваги такого підходу порівняно з традиційними стратегіями мультикласифікації («один проти всіх», «один проти одного»).

У *четвертому* розділі «Застосування розробленої технології аналізу цифрових зображень в прикладних задачах» представлено результати експериментальної апробації розробленої технології на двох медичних задачах. Описано умови проведення прикладних досліджень, зокрема апаратне та програмне забезпечення (*Python*). Розглянуто методику поділу даних на навчальну, контрольну та екзаменаційну вибірки з урахуванням стратифікації за пацієнтами та використання k -кратної перехресної перевірки. Подано метрики оцінки якості моделей (правильність, чутливість, специфічність, точність, F-міра) з розрахунком 95% довірчих інтервалів методом бутстрепа.

Перша прикладна задача – діагностика стадій фіброзу печінки за ультразвуковими зображеннями (1059 областей інтересу з 806 зображень, стадії F0-F4). Подано результати ієрархічної класифікації: групова класифікація стадій, мультикласифікація на рівні ОІ та на рівні пацієнтів.

Друга прикладна задача – діагностика COVID-асоційованих патологій легень за даними комп'ютерної томографії: 2355 сегментованих масок з КТ-

зрізів, стани: норма, гостра фаза COVID-19, консолідація з розвитком СЗЛ, Long COVID. Подано результати триетапної ієрархічної класифікації.

На завершення розділу надано практичні рекомендації щодо застосування розробленої технології в медичній практиці.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Наукові результати дисертації висвітлені у 15 наукових публікаціях здобувача, серед яких: 9 статей у наукових виданнях з переліку фахових видань України, в т.ч. 5 статей у виданнях категорії Б, 4 статті у періодичних виданнях, що індексуються в базі Scopus, з яких 1 у виданні, віднесеному до 1-3 кuartилів (Q1-Q3) відповідно до класифікації SCImago Journal and Country Rank; 2 інші статті; апробації у вигляді тез виступів на 4 наукових фахових конференціях.

Вказані статті свідчать про належний науковий рівень досліджень.

1. Науковий рівень публікацій:

- усі публікації прямо стосуються теми дисертаційного дослідження, розкриваючи як методологічні аспекти розробки технології ієрархічної класифікації та методу ВЛДОС, так і результати їх практичного застосування для діагностики фіброзу печінки та COVID-асоційованих патологій легень;
- у статтях детально описано використані методики: формування вибірок, виділення текстурних ознак, розроблення і перевірка класифікаційних моделей. Використання сучасних ансамблевих методів машинного навчання, принципів МГУА, генетичних алгоритмів та методу аналізу ієрархій свідчить про глибоке опрацювання теоретичної бази та застосування передових підходів;
- результати, представлені в публікаціях, супроводжуються аналізом їх значущості, висновки випливають з отриманих даних та проведеного аналізу;
- публікації відображають елементи наукової новизни дисертації: метод ВЛДОС і технологію ієрархічної класифікації, та їх прикладне застосування.

2. Дотримання принципів академічної доброчесності:

- зміст публікацій послідовно відображає основні наукові положення, методики, результати і висновки дисертаційного дослідження автора;
- у всіх наданих публікаціях Бабенко В.О. є співавтором, що відповідає практиці підготовки дисертаційних робіт; його внесок, як правило, пов'язаний з розробленням алгоритмів, виконанням досліджень та аналізом результатів;
- у статтях наявні посилання на актуальні наукові праці, що свідчить про належне врахування попередніх досліджень у даній галузі та коректне висвітлення внеску інших авторів;
- представлені в публікаціях результати та розробки (зокрема, метод ВЛДОС та технологія ієрархічної класифікації) мають ознаки оригінальності;

• на основі аналізу наданих публікацій не виявлено очевидних ознак плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних. Дотримано етичні норми щодо подання результатів медичних досліджень за участю пацієнтів (анонімізація, посилання на дозволи етичних комітетів у відповідних розділах дисертації).

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувача.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Загальні зауваження:

- в назві є слово «модальностей», яке в роботі більше не зустрічається, навіть серед ключових слів;
- неправильно сформульовано *Об'єкт* дослідження: «Аналіз діагностичних зображень» - має бути «*Процес аналізу...*»;
- неточно сформульовано *Мету* роботи: «Вдосконалення методів класифікації для підвищення точності виявлення патологій за цифровими зображеннями» - занадто загально, має бути «...за медичними цифровими зображеннями»;
- серед ключових слів відсутнє справді ключове «*інформативні ознаки*»;
- чомусь вказано лише 2 пункти наукової новизни, хоча їх насправді принаймні 3, що і вказано у цьому відгуку;

2. Термінологічні зауваження:

- зустрічаються неоднозначні терміни, які не пояснюються: *прозорість алгоритмів* машинного навчання; *аналітичні моделі*; *тренувальна вибірка*; *перетренування* моделі; *валідація* моделі; *стійкість до шуму та варіацій* у вхідних даних; *якість і репрезентативність* вибірки; *підвибірка* незалежних змінних – має бути *підмножина*; *стадіювання* фіброзу печінки – краще *діагностика стадій*; *ідентифікація COVID-асоційованих патологій легень* – краще *діагностика патологій*;
- автор часто використовує терміни «методи штучного інтелекту та машинного навчання», але ніде не вказує, як він їх розуміє і що саме до них відносить;
- плутанина з термінами: зустрічаються «*вилучення ознак*» і «*виділення ознак*», причому «*вилучення*» – некоректний термін; *похибка і помилка* моделі – точніше буде саме «*помилка*»; на с. 93 вказано «*поділ на навчальну, перевірку і контрольну вибірки*», а далі зовсім інакше: *навчальна, контрольна і екзаменаційна вибірки*;

3. У висновках до розділу 2 написано: «В даному розділі було представлено методологію та детальний опис послідовності формування сукупності інформативних ознак цифрових зображень», але насправді в цьому розділі немає ні «методології», ні «опису послідовності», а є детальний перелік різних способів формування ознак та пропозиція їх відбору за кореляціями, але методика використання цих способів не виписана. Проте загальна схема вибору ознак та відповідна послідовність кроків чомусь описана на самому

початку розділу 3, хоча це за логікою мало би бути в завершальному параграфі розділу 2. До того ж у розділі 4 двічі вказано, що в обох прикладних задачах застосовується «алгоритм селекції найбільш інформативних ознак», який ніде не описано в явному вигляді.

4. Відсутня детальна характеристика обчислювальної складності запропонованого методу ВЛДОС порівняно з класичними ансамблями (випадковий ліс, XGBoost та LightGBM), особливо з урахуванням етапів генетичної оптимізації та застосування методу аналізу ієрархій. Те ж саме стосується загалом обчислювальних витрат розробленої технології ієрархічної класифікації.
5. На с. 105 у 4 розділі вказано, що «алгоритм селекції найбільш інформативних ознак сформував фінальну множину з 178 ознак» (з усіх 780), і так само на с. 120 сказано про «фінальну множину з 26 ознак» (з усіх 720). Тут дуже важливо було би вказати, скільки саме з цих фінальних ознак увійшло в побудовані моделі класифікації.
6. Окремі числові характеристики, вказані в деяких підпунктах пункту 4 загальних висновків, не відображені в тексті роботи:
 - використання генетичних алгоритмів для оптимізації наборів ознак підвищує точність класифікації в середньому на 10% порівняно з випадковим добором ознак у класичному випадковому лісі;
 - застосування методу аналізу ієрархій для зваженого голосування враховує індивідуальний внесок кожного дерева ансамблю та збільшує загальну точність класифікації на 5–10% у порівнянні з простим усередненням;
 - запропонований метод ВЛДОС продемонстрував вищу точність, ніж класичний випадковий ліс і провідні ансамблеві методи (XGBoost, LightGBM). Хоча насправді кожен з чотирьох методів показав свою перевагу в окремих задачах, тобто всі вони є фактично рівноправними учасниками розробленої технології.
7. Зауваження щодо формул, рисунків і таблиць:
 - в (2.1) замість *min* і *max* має бути I_{min} та I_{max} ; в (2.5) не вказано, що таке i ; формули (2.8) та (2.17) слід пояснити; вираз (3.5) - некоректний;
 - автор називає вирази (4.1)-(4.6) «формулами», але тут насправді тільки (4.6) є формулою, а решта – просто математичні вирази;
 - ніде не вказано, як розраховуються ймовірності класів $P_i(x_j)$;
 - показаний на рис. 3.2 (в тексті помилкове посилання на 3.1) приклад дерева оптимальної складності слід було б описати у формі правил прийняття рішень;
 - результати, подані в таблицях 4.11 і 4.12 та 4.22 і 4.23, не містять належних коментарів та висновків, що знижує їх цінність;
8. Граматичні недоліки:
 - помилки: с. 4 «Робота виконана виконано»; с. 48 «найчастіше зустрічаюче значення яскравості»; с. 68 «прийнято рішення кореляційний відбір ознак»; с. 48 «На її основі обчислюються FOS обчислюються на основі гістограми зображення»; с. 87 «Кожен класифікатор B_i діє згідно з наступною функцією:» (не дописано);

- проблеми з родовим відмінком: с. 20 «зображень одного об'єкту»; с. 85 «Дані датчику»; с. 108 «Для побудови метакласифікатору»;
- явні русизми: с. 111 «голосування по зображенням»; с. 118 «Розподіл масок по станам легень»; с. 103 «по стадіям фіброзу»; с. 99 «згідно договорів»; с. 104 «Згідно рекомендацій».

Незважаючи на те, що вказані недоліки дещо знижують загальне враження від рецензованої роботи, вважаю, що ці зауваження не є визначальними, стосуються передусім оформлення роботи і не применшують загальну наукову новизну та практичну значущість результатів та не впливають на загалом позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Бабенка Віталія Олеговича на тему «Технологія ієрархічної класифікації в задачах діагностики патологій за медичними зображеннями різних модальностей» виконана на належному науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого вирішує наукове завдання, що має істотне значення для галузі інформаційних технологій. Дисертаційна робота за актуальністю, науковою новизною та практичною цінністю повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Бабенко Віталій Олегович заслуговує на присудження йому ступеня доктора філософії в галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки.

Офіційний опонент:

Завідувач відділу інформаційних
технологій індуктивного моделювання
Інституту інформаційних технологій
та систем НАН України,
д-р техн. наук, професор

 Володимир СТЕПАШКО

«___» _____ 2025 року

 Підпис Володимир Степаненко засвідчую.
Пов. директора з інформаційних персоналом
Юлія Коваленко

