

ВІДГУК

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,
ГОЛУБА Сергія Васильовича на дисертаційну роботу
БОЙКО Наталії Іванівни «Методологія багатовимірного аналізу
мультимодальних даних», подану до захисту
на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук
за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології

1. Актуальність теми дисертації та її зв'язок з науковими програмами

Актуальність теми дисертаційного дослідження визначається необхідністю створення ефективних методів та інструментів інтелектуального аналізу медичних даних в умовах обмежених обсягів інформації. Подібні рішення є особливо важливими для сучасних клінічних досліджень, персоналізованої медицини та суміжних сфер, де формування великих вибірок даних часто ускладнене технічними, фінансовими чи етичними обмеженнями.

Для мультимодальних даних характерні висока розмірність ознак, наявність шумів, аномалій, пропусків та гетерогенна структура, що істотно ускладнює використання класичних моделей машинного навчання. Застосування ітеративних методів, орієнтованих на великі вибірки, у цьому випадку виявляється малоефективним через високий ризик перенавчання, чутливість до початкових умов і складність налаштування численних параметрів. Це суттєво обмежує їх практичну застосованість для розв'язання широкого спектра задач у зазначених галузях.

Важливість цього дисертаційного дослідження зумовлена потребою у розробленні та теоретичному обґрунтуванні нових методів багатовимірного аналізу мультимодальних медичних даних, спрямованих на підвищення точності класифікації станів пацієнтів. Запропоновані методи мають забезпечувати високу точність, стійкість до шумів та аномалій, відтворюваність результатів і здатність до узагальнення в умовах обробки різнорідних даних.

Також актуальність і прикладна значущість розв'язання окресленої теоретичної проблеми підтверджується активною участю здобувача у реалізації низки дослідницьких проєктів, спрямованих на аналіз мультимодальних медичних даних. Це засвідчує високий рівень затребуваності запропонованих методів і засобів як у фундаментальних дослідженнях, так і при вирішенні прикладних завдань у сфері медико-інформаційних технологій.

2. Наукова новизна результатів роботи



Автором розв'язано важливу наукову проблему існування протиріччя між обмеженнями традиційних методів аналізу мультимодальних даних та необхідністю відповідати сучасним вимогам до точності, швидкості й адаптивності інформаційних технологій. Наукова новизна отриманих результатів полягає у такому:

1. Вперше запропонована концепція аналізу мультимодальних даних, яка полягає у виділенні ознак для кожної модальності та їх об'єднанні в єдиний багатовимірний простір ознак, яка, на відміну від існуючих, забезпечує формування окремих множин ознак із різних модальностей для розробки методів класифікації станів пацієнта, що дозволяє підвищити інформативність масивів вхідних даних та збільшити кількість правильно класифікованих станів;

2. Вперше сформульовано принципи багатовимірного аналізу мультимодальних даних, які полягають в інтеграції різнорідних ознак та модальних моделей у єдиній інформаційній технології, яка, на відміну від існуючих, забезпечує адаптивність інформаційної технології до зміни властивостей масивів вхідних модальних та мультимодальних даних, що дозволяє збільшити кількість правильно класифікованих об'єктів та підвищити стійкість моделей-класифікаторів в умовах гетерогенності та неповноти медичних даних.

3. Вперше розроблено метод інтеграції модальних даних, який полягає у поєднанні цих даних за певними ознаками, що, на відміну від існуючих буде точки спостереження шляхом адаптивного, погодженого та поетапного об'єднання даних із різних модальностей в єдиний вектор та поєднання цих векторів, що дозволяє створити із окремих точок спостереження за пацієнтом спільний масив вхідних даних та формувати модель-класифікатор;

4. Вперше розроблено метод побудови мультимодальної моделі, який полягає у побудові моделей окремих модальностей та використанні результатів моделювання для класифікації станів пацієнта, який на відміну від існуючих, інтегрує результати моделювання в єдину ієрархічну структуру, що дозволяє підвищити кількість правильно класифікованих станів пацієнта.

5. Набув подальшого розвитку метод вибору інформативних ознак, адаптований до гетерогенності джерел мультимодальних даних, завдяки формуванню багатовимірного ознакового простору з урахуванням їх кореляційної узгодженості, що дозволяє підвищити стійкість моделей машинного навчання.

6. Удосконалено метод оцінювання ефективності аналізу мультимодальних даних, який базується на комплексному порівнянні результатів експериментів за точністю, повнотою, F1-метрикою, часом обробки та стабільністю роботи моделей, що дає змогу об'єктивно визначати переваги запропонованої технології,

збільшувати кількість правильно класифікованих станів та забезпечувати адаптацію системи до клінічних умов.

Сукупність сформульованих положень наукової новизни підтверджує отримання вагомих і оригінальних результатів, які в комплексі забезпечують розв'язання важливої наукової проблеми – існування протиріччя між обмеженнями традиційних методів аналізу мультимодальних даних та необхідністю відповідати сучасним вимогам до точності, швидкості й адаптивності інформаційних технологій.

3. Практична цінність результатів роботи

Практичне значення докторської дисертації полягає у впровадженні розроблених і вдосконалених методів та програмних засобів для розв'язання прикладних задач багатовимірного аналізу мультимодальних даних. Запропоновані підходи характеризуються високою точністю, стійкістю до шумів та аномалій, а також обчислювальною ефективністю, що робить їх придатними для використання у реальних клінічних дослідженнях. Ефективність і готовність до практичного застосування підтверджується актами впровадження та використання розроблених методів у діяльності підприємств.

Автором розроблено низку оригінальних методів, що успішно застосовуються для розв'язання задач у сфері багатовимірного аналізу мультимодальних даних. Запропонована методологія забезпечує можливість використання як лінійних, так і нелінійних алгоритмів машинного навчання, зокрема штучних нейронних мереж, для ефективного розв'язання прикладних задач. Розроблені та вдосконалені методи відзначаються високим рівнем універсальності, а їх міжгалузева придатність зумовлена гнучкою архітектурою, орієнтованою на обробку великих обсягів структурованих мультимодальних даних.

4. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Аналіз змісту докторської дисертації та використаного теоретико-методологічного інструментарію засвідчує високий рівень наукової обґрунтованості розроблених і вдосконалених методів, отриманих результатів, сформульованих висновків і практичних рекомендацій.

Зокрема, теоретичні положення докторської дисертації чітко формалізовані з використанням апарату математичного аналізу, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії штучних нейронних мереж та сучасних методів машинного навчання. Їхня достовірність підтверджується використанням

перевірених наукових гіпотез й теоретичних обґрунтувань побудови, функціонування та результатів використання розроблених і вдосконалених методів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується багаторівневою перевіркою, що охоплювала чисельне моделювання, порівняння з класичними методами машинного навчання за кількома критеріями ефективності, а також експериментальні дослідження на модельних і реальних медичних даних. Практична значущість і ефективність запропонованих рішень засвідчуються їх успішним впровадженням у діяльність низки підприємств України, що підтверджено відповідними актами впровадження та використання.

5. Повнота викладення основних результатів роботи

У межах виконання докторської дисертації Бойко Н.І. було опубліковано 60 наукових робіт: 9 монографій, 1 з яких – одноосібна; 19 статей опубліковано у виданнях, що входять до міжнародної наукометричної бази даних SCOPUS та Web of Science Core Collection, з них: 4 статті опубліковано в журналах з Q1-Q2, 10 статей – в журналах з Q3-Q4; 14 публікацій – у наукових фахових виданнях України; 12 публікацій – матеріали конференцій, 11 з яких – у виданнях, що індексуються в наукометричній базі даних SCOPUS. Практичну реалізацію результатів дослідження засвідчують п'ять зареєстрованих свідоцтв про авторське право на твір.

Усі результати, оприлюднені у наукових публікаціях, є особистим внеском автора. У випадках співавторства внесок здобувача визначений і задокументований.

6. Оцінка змісту та завершеності докторської дисертації

Дисертація Бойко Н.І. на тему «Методологія багатовимірного аналізу мультимодальних даних» є завершеним науковим дослідженням, викладеним на 396 сторінках, з яких основний текст становить 308 сторінок.

Структура роботи включає анотацію, вступ, шість розділів, висновки до кожного з них, загальні висновки, список використаних джерел і додатки. Робота містить 55 рисунків, 50 таблиць та три додатки. Перелік літератури охоплює 345 джерел і займає 39 сторінок. Оформлення роботи відповідає чинним вимогам, визначеним наказом МОН України №40 від 12.01.2017 щодо оформлення дисертацій.

У вступі автор обґрунтовує актуальність дослідження, формулює мету й завдання, визначає об'єкт, предмет, методи дослідження, а також викладає наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів. Тут також

подано відомості про апробацію, публікаційну активність і особистий внесок здобувача у співавторські роботи.

У першому розділі подано огляд сучасних підходів до опрацювання мультимодальних даних, проаналізовано їх характерні особливості та умови застосування методів багатовимірного аналізу. На основі літературних джерел систематизовано підходи до визначення сутності мультимодальних даних та узагальнено ключові проблеми, що виникають під час використання моделей штучних нейронних мереж для їх обробки. Проведено критичний аналіз існуючих методів багатовимірного аналізу, виокремлено їхні сильні сторони та обмеження. За підсумками аналізу сформульовано мету й окреслено основні завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі подано методологію багатовимірного аналізу мультимодальних даних. Розглянуто підходи до формалізації різнорідної інформації, її часової узгодженості та приведення до єдиного формату. Запропоновано методи побудови спільного простору ознак, що враховує гетерогенність, відмінності у часових характеристиках та неповноту даних. Обґрунтовано вибір алгоритмів класифікації, здатних ефективно визначати клінічні стани пацієнтів. Сформована методологія, що визначає як побудувати архітектуру інформаційної технології, визначити і поєднати методи та засоби обробки мультимодальних даних. Це створює умови для розроблення адаптивних та надійних систем підтримки клінічних рішень.

У третьому розділі представлено методи формування структурованого простору ознак, що поєднує дані різних модальностей для подальшого використання в класифікаційних моделях. Розглянуто підходи до обробки аудіосигналів (MFCC, HMM у поєднанні з глибинними мережами, SVM), зображень (SIFT, HOG, вейвлет-перетворення) та медичних даних (ЕЕГ, ЕКГ, МРТ, клінічні показники) із застосуванням цифрової фільтрації, спектрального й просторово-частотного аналізу. Запропоновано методи очищення сигналів від шумів, виділення ознак із часових рядів, трансформації МРТ у табличну форму та нормалізації клінічних параметрів. Усі модальності інтегруються в єдиний ознаковий простір, що зберігає інформативність даних та слугує основою для подальшого машинного навчання і створення медичних ІТ-систем.

У четвертому розділі обґрунтовано використання формального концептуального аналізу як теоретичної основи для структурування, узагальнення та інтерпретації мультимодальних медичних даних. Метод базується на формальному контексті, де пацієнти розглядаються як об'єкти, а їх характеристики – як ознаки. На цій основі формуються концепти, які

впорядковуюються у вигляді концептуальної решітки, що відображає ієрархію знань. У роботі наведено приклади побудови формальних контекстів, концептів і решіток для групи пацієнтів, а також сформовано велику множину концептів для реальних медичних даних. Для кожного концепту розраховано критерії якості (точність, швидкість, стійкість до шуму), що дало змогу виконати багатокритеріальну оптимізацію та виділити Парето-оптимальну підмножину. Експериментальні дослідження підтвердили ефективність підходу: він дозволяє виявляти локальні патерни станів пацієнтів, формувати інтерпретовані правила та підвищувати результативність автоматизованого аналізу медичних даних.

У п'ятому розділі розроблено методологію виявлення структурних відповідностей між гетерогенними медичними даними для класифікації станів пацієнтів. Запропоновано чотири методи (формалізація, узгодження, інтеграція, класифікація) та реалізовано підходи *feature-level fusion* і *model-level fusion*. Експерименти з використанням CDA показали рівнозначну інформативність модальностей і підтвердили доцільність мультимодального підходу. Отримані результати доводять ефективність запропонованої методології для побудови систем підтримки клінічних рішень.

У шостому розділі розроблено інформаційну технологію багатовимірного аналізу на основі нейромережевої архітектури з інтеграцією мультимодальних даних. Реалізовано два підходи: *feature-level fusion* та *model-level fusion*. Експерименти показали перевагу *feature-level fusion*, що досягла 96% точності на валідаційній вибірці та 85% – на тестовій, тоді як *model-level fusion* забезпечила лише 71,5%.

У висновках узагальнено основні результати, отримані в межах докторської дисертації та дозволяють у значній мірі усунути протиріччя між обмеженнями традиційних методів аналізу мультимодальних даних та необхідністю відповідати сучасним вимогам до точності, швидкості й адаптивності інформаційних технологій. У додатках наведено графічні матеріали й акти впровадження, що підтверджують практичну реалізацію одержаних результатів.

Автореферат відповідає змісту дисертації, написаний українською мовою з використанням сучасної наукової термінології. Опубліковані в авторефераті положення співпадають з основними положеннями докторської дисертації.

7. Ступінь використання матеріалів і висновків докторської дисертації

Наукові результати, положення та висновки, представлені у дисертації Бойко Н.І. на тему «Методологія багатовимірного аналізу мультимодальних даних», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – інформаційні технології, є самостійним дослідженням і

не містять матеріалів попередньої дисертації автора на тему «Формування інформаційних потоків та управління ними в логістичній системі торговельних підприємств», захищеної 2009 року у спеціалізованій вченій раді К 35.840.01 при Львівській комерційній академії.

8. Відсутність (наявність) академічного плагіату, фабрикації та фальсифікації

У поданій до захисту дисертаційні роботи Бойко Н.І. не виявлено ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації наукових результатів. Усі положення, результати, таблиці та графіки супроводжуються відповідними посиланнями на джерела, є належно задокументовані як результати власного авторського дослідження.

Робота виконана з дотриманням принципів академічної доброчесності відповідно до чинних нормативних вимог.

9. Відповідність докторської дисертації паспорту спеціальності та профілю докторської ради

Тема та зміст докторської дисертації Бойко Н.І. на тему «Методологія багатовимірної аналізу мультимодальних даних» узгоджується з науковим напрямком діяльності спеціалізованої вченої ради Д 73.052.04 при Черкаському державному технологічному університеті.

Докторська дисертація відображає положення паспорта спеціальності 05.13.06 – інформаційні технології: розроблення наукових і методологічних основ створення та застосування інформаційних технологій та інформаційних систем для автоматизованої переробки інформації й управління; розроблення інформаційних технологій для аналізу та синтезу структурних, інформаційних і функціональних моделей об'єктів і процесів, що автоматизуються; розроблення моделей і методів автоматизації виконання функцій і завдань виробничого й організаційного управління у звичайних і багаторівневих структурах на основі створення та використання нових інформаційних технологій.

10. Недоліки і зауваження до дисертації

1. При формулюванні наукової новизни не зазначено, чим відрізняються сформульовані принципи багатовимірної аналізу від уже існуючих.

2. Завдання № 5 докторської дисертації сформульовано як “*Розвинути метод вибору інформативних ознак ...*”, наукова новизна результату, отриманого при виконанні цього завдання, сформульована як “*Одержав подальший розвиток метод вибору інформативних ознак станів об'єкта ...*”. У висновку ж зазначено,

що «Розширено метод вибору інформативних ознак ...». Таким чином у дисертації допущена нескоординованість відображення форми постановки завдання 5 та отриманих результатів за цим завданням.

3. При формулюванні гіпотези 3 допущена неточність. Ця гіпотеза подана як «Поєднання даних створює ефект емерджентності, підвищуючи точність класифікації клінічних станів», було б коректніше зазначити, що «поєднання масивів модальних даних досягне ефекту емерджентності у формі зростання кількості правильно класифікованих даних при побудові моделей-класифікаторів».

4. На сторінці 24 реферату зазначено, що архітектура інформаційної технології підтримує два підходи. А на сторінці 6 ці підходи названі принципами.

5. У першому розділі дисертаційної роботи недостатньо детально розглянуті процеси застосування методів обробки даних у реальних медичних інформаційних системах, зокрема методів класифікації у медичній діагностиці.

6. У підрозділі 3.2 доцільно було б детальніше дослідити можливості поєднання прихованих марківських моделей із сучасними методами глибинного навчання моделей (наприклад, рекурентними нейронними мережами), а також розглянути порівняльні характеристики цих поєднань.

7. Рисунки на сторінках 168, 170, 171 підрозділу 3.4 не мають підписів.

8. У підрозділі 4.2 доцільним було б детальніше розглянути межі практичної реалізації описаного підходу на медичних даних: наскільки масштабованою є побудована модель для великих реальних вибірок, як вона співвідноситься з обчислювальними затратами та чи розглядалися обмеження при інтеграції з алгоритмами машинного навчання. Також можна було б підкреслити порівняльні переваги мультимодального формального концептуального аналізу перед класичним формальним концептуальним аналізом.

9. У підрозділі 4.3 недостатньо детально досліджений форми взаємозв'язку між окремими критеріями (точність, швидкість, робастність) та їх інтерпретацією у предметній області.

10. До рисунків 5.4–5.8, наведені у підрозділі 5.2, варто додати більш розгорнутий опис до кожного з них (що саме зображено, які ключові висновки можна зробити з графіка).

11. Таблиці на сторінці 226 не мають підписів.

Зазначені недоліки суттєво не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи, яка присвячена розв'язанню актуальної наукової проблеми, характеризується новизною отриманих результатів, має практичне значення та свідчить про самостійність та завершеність проведеного дослідження.

11. Висновок

Дисертаційна робота Бойко Наталії Іванівни на тему: «Методологія багатовимірного аналізу мультимодальних даних» є завершеним науковим дослідженням, виконаний авторкою самостійно, яка дозволяє усунути актуальну наукову проблему існування протиріччя між обмеженнями традиційних методів аналізу мультимодальних даних та необхідністю відповідати сучасним вимогам до точності, швидкості й адаптивності інформаційних технологій.

За змістом дисертація відповідає паспорту спеціальності 05.13.06 – Інформаційні технології. За актуальністю теми дисертації, обсягом та рівнем виконаних теоретичних та експериментальних досліджень, науковою новизною та практичною цінністю, ступенем обґрунтованості та достовірності результатів, а також повнотою опублікування результатів досліджень, дисертація відповідає вимогам, які висуваються до докторських дисертацій положенням пунктів 7-9 «Порядку присудження та позбавлення наукового ступеня доктора наук», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 17 листопада 2021 року №1197.

Враховуючи зазначене вважаю, що БОЙКО Наталія Іванівна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології.

Офіційний опонент:
завідувач кафедри програмного
забезпечення автоматизованих
систем Черкаського державного
технологічного університету,
доктор технічних наук, професор

 Сергій ГОЛУБ

Університетський секретар
Ірина Шляхетська
к.т.н., доцент



Ірина Шляхетська