

Голові спеціалізованої вченої ради
ДФ 26.162.001 Державної установи
«Науковий центр аерокосмічних досліджень
Землі Інституту Геологічних наук
Національної академії наук України»

вул. О. Гончара 55-б, 1, м. Київ, 01054

В І Д Г У К

офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента
ВАСИЛЬЕВОЇ Ірини Карлівни
на дисертаційну роботу **АНДРЕЄВА Артема Андрійовича**
на тему «Методика класифікування об'єктів на аеро- та космічних
зображеннях в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак»,
яку представлено на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертації

Аерокосмічні знімки широко використовують для вирішення безлічі прикладних та дослідницьких завдань. Зростання попиту на дані аерофотозйомки та супутникової зйомки стимулює розвиток багатьох суміжних галузей: від створення космічних ракетних комплексів та виробництва дронів до технологій оброблення зображень та роботи з «великими даними». Ці тренди знаходять своє відображення у національних та міжнародних науково-технічних програмах. Так, Міністерство з питань стратегічних галузей промисловості спільно з Державним космічним агентством України розробило науково-технічну космічну програму України на 2021-2025 роки, яка передбачає реалізацію низки завдань, серед яких створення космічних систем моніторингу навколоземного простору, а також забезпечення використання інформаційних сервісів європейської навігаційної супутникової системи EGNOS/Galileo на території України. Важливою частиною аерокосмічної галузі є виробництво безпілотних літальних апаратів (БПЛА), виробництво яких за останні роки зросло багаторазово. Це обумовлено, зокрема, їх рентабельністю, оперативністю та можливістю отримання знімків високої роздільної здатності. Крім того, БПЛА

простіше оснащувати мультиспектральними камерами, що значно розширює можливості їх застосування. Ключовими факторами, що сприяють зростанню ринку технологій дистанційного зондування, є збільшення кількості проєктів зі спостереження Землі, розширення використання даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в оборонних цілях, впровадження технологій точного землеробства, розвитку «зеленої» економіки тощо. Дані ДЗЗ потрібні для картування земної поверхні та моніторингу змін її стану, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій, боротьби зі стихійними лихами, управління природними ресурсами та ін. Розв'язання таких завдань пов'язане з аналізом об'єктів на зображеннях з подальшим їх розпізнаванням та ідентифікацією. Таким чином, розробка методів, що забезпечують високу достовірність класифікації даних ДЗЗ, безсумнівно, є *актуальним* науковим і практичним завданням.

Першим етапом розпізнавання об'єктів є вибір ознак; при цьому від роздільних якостей (інформативності) обраних ознак суттєво залежить достовірність розпізнавання. Проблема формування інформативного ознакового простору стає особливо *актуальною* у зв'язку із збільшенням спектральної та просторової роздільної здатності космічних засобів ДЗЗ. Від розмірності ознакового простору значною мірою залежать витрати на вимір необхідних характеристик об'єктів спостереження, обчислювальна складність процедур навчання та прийняття рішення та достовірність класифікації. Крім того, навчальні вибірки на практиці зазвичай не задовольняють умов компактності та роздільності в ознаковому просторі, що ускладнює класифікацію. Тому важливим завданням є розробка методики класифікації аерофотознімків та супутникових зображень з урахуванням низької роздільності ознак класів. Саме на вирішення цього завдання і спрямовано дисертаційну роботу Андрєєва А. А. Таким чином, тематика дисертаційної роботи є *актуальною*.

Зв'язок з науковими програмами та темами

Тема роботи пов'язана з напрямками наукових досліджень, що проводились у Державній установі «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України», а саме: «Дистанційні методи вирішення задач сталого розвитку і раціонального природокористування, засновані на комплексному аналізі гетерогенних геопросторових даних» (№ 0121U107677); «Оцінка ризиків негативних змін навколишнього середовища за даними дистанційного зондування Землі» (№ 0122U002443); «Програмний модуль підвищення просторової розрізненості оптимального набору субпіксельно зміщених зображень» (№ 0122U201983); «Методика оцінювання динаміки опустелювання

на основі даних супутникового знімання на прикладі піщаного масиву Олешківські піски» (№ 0121U111862); «Система раннього попередження деградації земель порубіжжя Європейського союзу на основі даних дистанційного зондування Землі» (№ 101086250 – EWALD); «Дистанційні методи виявлення та аналізу розвитку загрозливих природних та природно-техногенних процесів та явищ в задачах геоінформаційного забезпечення прийняття управлінських рішень щодо сталого розвитку територій» (№ 0122U002085); «Цільова науково-технічна програма оборонних досліджень НАН України на 2020-2024 рр.» (№ 0121U000075д); «Розробка нових аерокосмічних технологій вивчення, прогнозування, запобігання та мінімізації ризиків надзвичайних ситуацій природного та природно-антропогенного походження» (№ 0017U004264); «Методи тематичного аналізу гетерогенних геопросторових даних при вирішенні задач дистанційного зондування Землі в умовах неповноти та обмеженості наявної інформації» (№ 0116U000144); «Розробка і впровадження сучасних аерокосмічних технологій дослідження Землі для оцінювання та прогнозування небезпечних природних і антропогенних процесів і явищ, формування рекомендацій по оптимізації пошуків, розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин з метою мінімізації негативного впливу на довкілля» (№ 0121U111862).

Впровадження у зазначених вище НДР результатів дисертаційної роботи Андреєва А. А. свідчить про її наукову значимість.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації

Розроблені автором і викладені у дисертації наукові положення, висновки та рекомендації мають достатній рівень обґрунтованості. Дисертантом опрацьовано і проаналізовано значну кількість літературних джерел як вітчизняних, так і зарубіжних вчених, фахівців у галузях цифрового оброблення зображень, розпізнавання образів та машинного навчання. Результати виконаних досліджень спираються на відомі досягнення у предметній галузі та не суперечать теоретичним закономірностям, відомим фактам та загальноприйнятим уявленням про властивості класифікаційних ознак об'єктів на цифрових аерокосмічних знімках. В процесі дослідження застосовано загальнонаукові та спеціальні прийоми і методи пізнання; їх використання дозволило дисертанту науково обґрунтувати теоретичні, методологічні та практичні аспекти формування та застосування запропонованої методики класифікування об'єктів на багатоканальних аеро- та космічних зображеннях.

Висновки та рекомендації автора є логічними і витікають із результатів об'єктивного аналізу результатів, отриманих експериментально – шляхом проведення серії процедур розпізнавання реальних тестових зображень та визначення критеріїв точності класифікації. Обґрунтованість і достовірність отриманих результатів дослідження, наукових положень та рекомендацій дисертанта підтверджено їх апробацією на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях.

Достовірність одержаних результатів

Достовірність отриманих в дисертаційній роботі наукових результатів підтверджується:

1) коректною постановкою мети та часткових наукових завдань дослідження, застосуванням відповідного математичного апарату і використанням реальних вхідних даних (еталонних зображень з геопросторової бази даних Шацького полігону ДЗЗ, даних багатоспектральної зйомки з квадрокоптера DJI Phantom 4 Multispectral, знімки Landsat-OLI8);

2) використанням світового досвіду у формі детального аналітичного огляду наукових публікацій за тематикою дослідження;

3) порівняльним аналізом результатів застосування запропонованої методики та відповідних результатів класичного розпізнавання.

Наукова новизна та важливість результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

Вперше розроблено метод оцінювання розділимості навчальної вибірки при контрольованому класифікуванні об'єктів на аеро- та космічних зображеннях, особливістю якого є формування оцінки відносно конкретного метода класифікування, вхідних даних та їхньої структури.

Вперше розроблено методику класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак, яка включає в себе застосування одного з двох розроблених способів залежно від об'єму даних. При надлишковому об'ємі даних використовується спосіб зменшення розмірності навчальної вибірки, а при обмеженому об'ємі даних – спосіб кластеризації навчальної вибірки.

Вперше розроблено спосіб кластеризації навчальної вибірки на основі розробленого методу оцінювання розділимості навчальної вибірки.

Особливістю даного способу є використання оцінки розділимості навчальної вибірки як критерію для визначення оптимальної кількості кластерів.

Вперше розроблено спосіб зменшення розмірності навчальної вибірки на основі розробленого методу оцінювання розділимості навчальної вибірки.

Особливістю цього способу є те, що відбір ознак на кожній ітерації процедури здійснюється за критерієм розділимості навчальної вибірки. Таким чином досягається не лише зменшення розмірності вхідних даних, а і підвищення їх розділимості.

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

Аргументування та критичність оцінки запропонованих автором рішень порівняно з відомими

Метою дослідження є підвищення достовірності класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях шляхом розробки методики, яка націлена на підвищення розділимості розпізнавальних ознак.

Об'єкт дослідження – класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак.

Предмет дослідження – навчальна вибірка, її кластеризація та зменшення розмірності.

Для досягнення поставленої мети у роботі розв'язано такі часткові наукові завдання:

1. Проведено аналіз методів класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях. Обґрунтовано вибір для подальшого дослідження контрольованих методів класифікування.

2. Проаналізовано властивості набору навчальної вибірки. Розглянуто такі властивості, як повнота, рівномірність, чистота, протиріччя, компактність, складність та розмірність. Проведено аналіз підходів до обробки навчальної вибірки. Показано, що спільним недоліком розглянутих підходів є те, що вони не враховують фактор розділимості навчальної вибірки.

3. Розроблено метод оцінювання розділимості навчальної вибірки. Оцінювання розділимості двох класів навчальної вибірки базується на розрахунку середнього арифметичного показників чутливості та специфічності. Оцінювання розділимості всього набору навчальної вибірки виконується на основі або показника загальної точності класифікації, або капа-індексу.

4. Розроблено два методи формування навчальної вибірки на основі центроїдних методів кластеризації: 1) з кластерів початкових класів; 2) з центрів кластерів початкових класів. Слід зазначити, що такий підхід може бути корисним при автоматичному створенні переліку класів за умов апіорної невизначеності.

5. Запропоновано спосіб зменшення розмірності навчальної вибірки. Розроблено алгоритм послідовної редукції, в якому селекція інформативних ознак здійснюється за критерієм розділимості вибірки.

6. Виконано експериментальну оцінку ефективності застосування розробленої методики класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак. Показано, що разом із значним зменшенням розмірності простору ознак (майже в три рази) зросла загальна точність класифікації (на 2–5%).

7. Надано рекомендації щодо впровадження розробленої методики. Зазначено особливості застосування розроблених методів кластеризації навчальної вибірки та процедури зменшення розмірності простору ознак.

Практична значимість та важливість для галузі

Практична значимість дисертаційного дослідження полягає в тому, що здобувачем закладено основи практичного оцінювання ступеня розділимості навчальних вибірок та розроблено комплексну методику класифікування об'єктів на аерокосмічних зображеннях, яка забезпечує підвищення достовірності класифікації в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак при одночасному зменшенні кількості ознак (шарів кубу геопросторових даних), що, в свою чергу призводить до зниження витрат обчислювальних ресурсів та зменшення часу на ухвалення рішень за даними ДЗЗ.

Отримані здобувачем наукові результати можуть знайти своє практичне застосування у автоматизованих системах дистанційного моніторингу з використанням даних, отриманих з аерокосмічних зображень.

Практичну значимість одержаних результатів і достовірність наукових положень підтверджено актами впровадження, копії яких наведено у дисертації (стор. 174, 175).

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку джерел посилань та трьох додатків. Загальний обсяг дисертації 175 сторінок.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, показано її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету та завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет та методи дослідження, зазначено, в чому полягають наукова новизна та практична значимість отриманих результатів. Наведено дані про апробацію матеріалів дисертації, особистий внесок здобувача, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У *першому розділі* проаналізовано методи класифікування об'єктів на аерокосмічних зображеннях та обґрунтовано вибір для подальшого дослідження методів класифікування із навчанням; розглянуто властивості навчальної вибірки та особливості підходів до її формування; викладено постановку завдання дослідження. Для виконання поставленого наукового завдання визначено та представлено низку часткових наукових завдань.

У *другому розділі* описано та обґрунтовано форму подання початкових даних, докладно розглянуто складові куба геопросторових даних, а також можливості формування шаблону геопросторових даних для певних тематичних задач класифікування. Розроблено два методи формування навчальної вибірки на основі центроїдних методів кластеризації: з кластерів початкових класів та з центрів кластерів початкових класів. Запропоновано метрики оцінювання розділимості навчальної вибірки та розглянуто алгоритми методу оцінювання розділимості як двох окремих класів навчальної вибірки, так і всього набору в цілому.

У *третьому розділі* розроблено методику навчання класифікатора, яка, залежно від об'єму та структури початкових даних, включає процедуру зменшення розмірності навчальної вибірки, а також один з двох методів кластеризації навчальної вибірки з метою підвищення розділимості класів даного набору.

У *четвертому розділі* виконано дослідження ефективності розробленої методики за результатами класифікування об'єктів на реальних зображеннях, отриманих з супутників Sentinel-2, Landsat-OLI8 та квадрокоптера DJI Phantom 4 Multispectral, та надано рекомендації щодо застосування розробленої методики.

У висновках стисло сформульовано основні результати дисертаційного дослідження та наведено досягнуті значення критеріїв достовірності класифікування до та після застосування розробленої методики.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковий напрям 172 Телекомунікації та радіотехніка в частині класифікування об'єктів на аеро- та космічних зображеннях.

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

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Андрєєва Артема Андрійовича 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 відповідне джерело.

Оцінка мови та стилю дисертації

Дисертаційна робота написана українською мовою.

Мова та стиль викладення дисертації дозволяють цілком зрозуміти суть розроблених наукових положень та одержаних практичних результатів. Структура роботи є продуманою та логічною, всі розділи дисертації мають внутрішню єдність та змістову завершеність. З огляду на предметну область дослідження, вживані терміни є загальноприйнятими, а їх використання – досить коректним. Отримані підсумкові результати досліджень, висновки та рекомендації повністю узгоджуються із метою роботи та науковими завданнями, зазначеними у вступі. Таким чином, дисертаційна робота є добре структурованою, логічною та завершеною науковою працею.

Підтвердження повноти викладу результатів дисертації в наукових фахових виданнях

За результатами досліджень опубліковано 21 наукову працю, у тому числі 2 публікації у монографіях (з них 1 проіндексована в базі даних Scopus), 4 статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України категорії Б, 5 статей у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus, 10 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій (з яких 8 проіндексовані в базі даних Scopus).

Наведений перелік публікацій автора дає підстави для висновку, що результати проведеного дослідження, запропоновані методи та алгоритми, висновки та практичні рекомендації повністю висвітлено у друкованих наукових працях Андреева А. А. Достовірність основних положень дисертації підтверджується як публікаціями у періодичних фахових виданнях, так і виступами дисертанта на наукових конференціях. Таким чином, повнота викладу результатів дисертації повністю відповідає встановленим вимогам.

Дискусійні положення та зауваження щодо дисертаційного дослідження

Незважаючи на в цілому позитивну оцінку викладених у дисертації положень, висновків і рекомендацій, слід відзначити і наявність декількох моментів, що мають дискусійний характер або викликають зауваження. До них, зокрема, можна віднести наступні:

1. Запропоновані індекси розділимості навчальної вибірки розраховують за результатами класифікування. Отже, ці індекси пов'язані з критерієм ухвалення рішення, обраним для конкретного класифікатора, і тому можуть характеризувати більшою мірою ефективність класифікатора, ніж ступінь розділності вибірових даних.

2. Наведена постановка задачі зменшення простору ознак (стор. 95, 96) неявно передбачає, що із зменшенням шарів кубу геопросторових даних критерій розділимості спочатку зростає, а далі – зменшується. Можливо, краще було ввести як обмеження задачі умову, щоб критерій розділимості не зменшувався нижче деякого допустимого рівня.

3. Згідно з даними, наведеними в матрицях помилок (стор. 124), точність розпізнавання деяких класів об'єктів («штучні поверхні», «інші землі») після оптимізації куба просторових даних дещо знизилася. Тому було б доречно проаналізувати причини цього і навести рекомендації щодо доцільності застосування процедури оптимізації простору ознак для розпізнавання специфічних класів.

4. Контрольоване класифікування виконувалось за метричним критерієм відстані Махаланобіса, втім обґрунтування вибору критерія не було надано.

5. Достовірність бінарної класифікації мін на тестовому зображенні визначалася за коефіцієнтом кореляції Пірсона. Цей критерій дійсно характеризує ступінь подібності між бінарним зображенням результатів класифікації та завірковою картою, але він не враховує помилки 1-го роду (або «false positives»), тому дає завищені оцінки достовірності класифікації.

6. Замість терміну «щільність ознак» (стор. 30) слід було вжити «щільність розподілу ймовірностей ознак».

7. У роботі зазначено, що «Компактність характеризує схожість ознак репрезентів різних класів» (стор. 33); з цього нібито випливає, що чим більш схожими є ознаки представників різних класів, тим більш компактною є вибірка, хоча насправді це не так.

8. У тексті для одного і того ж терміну використано кілька позначень: у більшості випадків – «капа-індекс», інколи – каппа індекс (стор. 18, 76, 79) або каппа-індекс (стор. 72, 80, 132).

Висновки

За результатами вивчення дисертаційної роботи Андреева А. А., та опублікованих ним наукових праць за темою дисертації можна зробити висновок, що робота є завершеним кваліфікаційним науковим дослідженням. Наукові результати в повному обсязі розкривають шляхи вирішення наукового

завдання підвищення достовірності класифікування об'єктів на аерокосмічних зображеннях в умовах низької розділимості розпізнавальних ознак.

За своїм змістом та одержаними результатами робота, незважаючи на зауваження, задовольняє вимогам пунктів 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 12.01.2022 № 44, а її оформлення відповідає вимогам наказу МОН України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами від 12.07.2019 р.), а її автор Андреєв Артем Андрійович заслуговує присудження ступеня доктора філософії у галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Опонент

доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій імені О. О. Зеленського, факультету радіоелектроніки, комп'ютерних систем та інфокомунікацій

Національного аерокосмічного університету імені М. Є. Жуковського «ХАІ»

кандидат технічних наук, доцент



Ірина ВАСИЛЬЄВА

17 листопада 2023 року

Підпис І. К. Васильєвої засвідчую

Проректор з наукової роботи
Національного аерокосмічного університету
імені М. Є. Жуковського «ХАІ»

доктор технічних наук, професор



Володимир ПАВЛІКОВ