

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МЕЛІТОПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ БОГДАНА ХМЕЛЬНИЦЬКОГО



ШЕДЛОВСЬКА ЯНА ІГОРІВНА

УДК 004.932:514.18

**ДЕШИФРУВАННЯ ТА АНАЛІЗ БАГАТОВИМІРНИХ
ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ВИСОКОЇ
ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕНОСТІ**

05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Мелітополь – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара Міністерства освіти і науки України (м. Дніпро).

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Гнатушенко Володимир Володимирович,
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» (м. Дніпро),
завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ванін Володимир Володимирович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ),
декан фізико-математичного факультету;

кандидат технічних наук, доцент
Щербина Віктор Михайлович,
Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного (м. Мелітополь),
доцент кафедри теоретичної механіки та комп'ютерного проектування імені професора В.М. Найдиша.

Захист відбудеться «27» квітня 2021 року о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 18.053.02 при Мелітопольському державному педагогічному університеті імені Богдана Хмельницького за адресою: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, вул. Гетьманська, 20, МДПУ імені Богдана Хмельницького, ауд. 35.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького за адресою: 72312, Запорізька обл., м. Мелітополь, вул. Гетьманська 10.

Автореферат розісланий « 16 » березня 2021 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Д. В. Спирінцев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дані дистанційного зондування (ДДЗ) використовуються у багатьох сферах людської діяльності: у сільському господарстві для контролю стану та прогнозування врожаю, моніторингу стихійних лих, контролю використання природних ресурсів, картографуванні та створенні кадастрових планів. Характеристики систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та отриманих даних постійно змінюються і вдосконалюються. Поява багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, що охоплюють широкі ділянки спектру, значно розширює можливості дистанційного моніторингу. В останні роки було запущено сучасні супутникові системи, що дозволяють отримувати багатовимірні зображення земної поверхні високої просторової розрізненості, зокрема супутники WorldView-2 та WorldView-3 спроможні отримувати зображення з просторовою розрізненістю 0,46 м та 0,31 м на піксель з періодичністю близько однієї доби. Щодня супутники передають на Землю величезні обсяги даних, тому виникає потреба у засобах автоматизованої обробки отриманих даних для їх подальшого використання.

Дані з супутників надходять у необробленому апаратному вигляді, що викликає необхідність у створенні методів їх подальшої обробки. На теперішній час, актуальною є розробка методів та технологій, що дозволяють підвищувати інформативність ДДЗ, усувати геометричні викривлення, що виникають при фіксації даних сучасними сканерними системами. Особливо важливою проблемою є дешифрування та аналіз супутникових знімків. Дешифрування включає у себе такі задачі як класифікація супутникових знімків, ідентифікація різних типів об'єктів земної поверхні, пошук об'єктів певного типу.

Наукові роботи закордонних та вітчизняних дослідників, зокрема О.С. Бутенко, Р. Вудса, І.М. Гаркуші, В.В. Гнатушенка, Р. Гонсалеса, О.Л. Дорожинського, Є.І. Калантарова, Ю.О. Карпінського, Д. Команичу, В.М. Корчинського, Н.М. Куссуль, С.В. Скакуна, С.А. Станкевича, А.Ю. Шелестова, В. Цая та їх учнів присвячені вирішенню сучасних прикладних задач по дешифруванню супутникових зображень, але в основному спрямовані на вирішення сільськогосподарських завдань та ідентифікацію об'єктів певного типу. При цьому будь-які апріорні відомості про кількість класів, а також класифіковані навчальні вибірки, як правило, відсутні. Крім того, при класифікації зображень високої просторової розрізненості істотно зростає внутрішньокласова неоднорідність спектральних характеристик об'єктів. У зв'язку з цим, виникає потреба створення нових методів, які дозволять виконувати весь цикл обробки зображень: геометричну корекцію, аналіз, дешифрування окремих об'єктів і класифікацію всього зображення. Тому особливої значущості набуває проблема створення нових технологій автоматизованої обробки багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, отриманих у видимій та ближній інфрачервоній ділянках спектру. Актуальність дисертаційного дослідження визначається необхідністю розробки ефективних методів дешифрування та аналізу багатовимірних фотограмметричних сканерних зображень високої просторової розрізненості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи повністю відповідає науковим напрямам, які виконуються в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара з моделювання процесів формоутворення, ідентифікації та аналізу зображень проекційної природи. Робота виконана на кафедрі комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара в межах НДР 0116U001297 «Методи та інформаційні технології цифрової обробки багатоканальних даних» (2016–2018р.) і НДР №0119U101205 «Алгоритмічне та програмне забезпечення інформаційних технологій» (2019–2021 рр.).

Результати досліджень впроваджено в ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» та філії національного центру управління та випробувань космічних засобів «Дніпрокосмос» Державного космічного агентства України (м. Дніпро).

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційного дослідження є підвищення рівня автоматизації, точності та швидкодії попередньої обробки, аналізу та дешифрування багатоканальних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, що враховують принципи сканерного формування знімків та їх характеристики.

Для досягнення цієї мети необхідно *вирішити такі основні задачі:*

- дослідити сучасні підходи, методи та інформаційні технології аналізу та обробки багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, зокрема даних дистанційного зондування;
- розробити технологію компенсації тіней на супутникових зображеннях високої просторової розрізненості;
- визначити оцінки ефективності методів ідентифікації тіней для застосування до супутникових зображеннях високої просторової розрізненості з метою уникнення похибок та підвищення ефективності ідентифікації;
- розробити технологію дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості на основі об'єктно-орієнтованого підходу;
- дослідити вплив вибору методу сегментації супутникових зображень високої просторової розрізненості на точність класифікації;
- визначити, які властивості зображення дозволяють провести ідентифікацію різних типів об'єктів, присутніх на супутникових знімках;
- розробити технологію автоматизованої ідентифікації лінійних об'єктів зображення для реалізації методу геометричної корекції аерокосмічних сканерних зображень;
- виконати програмну реалізацію і апробацію розроблених технологій.

Об'єктом дослідження є процес обробки та аналізу багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, зокрема даних дистанційного зондування, одержаних в різних спектральних діапазонах електромагнітного випромінювання.

Предметом дослідження є методи геометричної і радіометричної корекцій, комплексного аналізу та дешифрування багатовимірних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості.

Методи дослідження. Розроблені в дисертаційній роботі засоби обробки супутникових знімків базуються на методах геометричного моделювання, математичної статистики, багатовимірної геометрії, обчислювальної математики, теорії зображень та комп'ютерної графіки.

Наукова новизна одержаних результатів. Основні результати, які визначають наукову новизну і виносяться на захист, є наступними:

Вперше:

- розроблено нову технологію дешифрування супутникових зображень високої просторової розрізненості на основі об'єктно-орієнтованого підходу, який дозволяє отримати класифіковане зображення земної поверхні та виділити на ній різні типи об'єктів;

- запропоновано та обгрунтовано підхід до вибору методу сегментації для обробки аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості, що дозволило підвищити достовірність подальшого розпізнавання об'єктів земної поверхні;

- розроблено нову технологію ідентифікації та компенсації тіней, яка базується на фізичних принципах виникнення тіні на фотограмметричних зображеннях, що дозволяє якісно компенсувати тіньові ділянки та підвищити достовірність подальшого розпізнавання об'єктів земної поверхні.

Вдосконалено:

- метод ідентифікації тіней шляхом автоматизації вибору оптимального порогу бінаризації, що дозволяє аналізувати різночасові зображення, отримані за різних умов зйомки (освітлення);

- метод геометричної корекції фотограмметричних сканерних зображень на основі проєктивного й афінного подання складних законів обробки з автоматизацією виділення лінійних об'єктів;

- процес сегментації супутникових знімків шляхом застосування процедури покращення результатів сегментації, що дозволяє запобігти надмірної сегментації та мінімізувати кількість розривів границь сегментів;

- метод компенсації тіней шляхом пошуку ділянок, що відносяться до одного типу поверхонь.

Набули подальшого розвитку:

- підхід до аналізу супутникових знімків на основі розрахунку спектральних, просторових, геометричних, текстурних та статистичних властивостей об'єктів;

- спосіб виділення лінійних елементів при геометричній корекції аерокосмічних зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами.

Обгрунтованість і достовірність результатів. Основні теоретичні положення дисертації одержані шляхом коректного застосування методів геометричного моделювання та багатовимірної геометрії з використанням сучасних уявлень про фізичні механізми формування сканерних зображень високої просторової розрізненості. Достовірність та коректність результатів підтверджено відомими методами оцінки результатів обробки зображень; комп'ютерною реалізацією розроблених методів у вигляді прикладних алгоритмів дешифрування та попередньої обробки багатовимірних цифрових зображень, які у сукупності утворюють цілісний програмний комплекс; впровадженнями результатів роботи.

Практичне значення одержаних результатів. Практичне значення дисертації підтверджується впровадженнями результатів роботи у практику робіт ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» (м. Дніпро) та «Дніпрокосмос» філії Національного центру управління та випробувань космічних засобів ДКАУ при обробці багатоспектральних супутникових зображень високої просторової розрізненості, зокрема одержаних з космічних апаратів «Worldview».

Практична значущість одержаних результатів визначається суттєвим підвищенням швидкодії та точності обробки цифрових супутникових зображень, теоретичною базою якого є методи геометричної корекції, класифікації, ідентифікації об'єктів, і складається з таких компонентів:

- економії обчислювальних ресурсів, потрібних для дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень;
- підвищення точності та достовірності прийняття рішень про ідентифікацію тінєвих ділянок з можливістю їх контролю та пов'язаною з цим оптимізацією обсягів обчислювальних ресурсів;
- економії матеріальних і трудових ресурсів при експлуатації розроблених програмних модулів.

Особистий внесок здобувача. Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист і складають наукову новизну виконаних досліджень, отримані особисто здобувачем. У наукових публікаціях, створених у співавторстві, здобувачу належить: розробка технології компенсації тінє на багатовимірних супутникових знімках високої просторової розрізненості [1]; дослідження та розрахунок властивостей зображення, за якими можуть бути ідентифіковані будинки [2]; аналіз супутникових знімків високої просторової розрізненості на основі властивостей присутніх на них об'єктів [3]; розробка технології класифікації супутникових знімків високої просторової роздільної здатності [4]; розрахунок властивостей об'єктів зображення для подальшого їх використання при класифікації [5]; ідентифікація будинків на супутникових знімках на основі об'єктно-орієнтованого підходу [7]; покращення методу компенсації тінє на супутникових знімках шляхом додавання процедури обробки границі тінєвих ділянок [9]; розробка методу ідентифікації тінє та компенсації тінє на супутникових знімках високої просторової розрізненості [10]; розробка методу ідентифікації тінє з використанням автоматичного пошуку оптимального порогу бінаризації [11]; автоматизація методу компенсації тінє на супутникових знімках [12]; дослідження властивостей супутникових знімків, що можуть бути використані для аналізу та класифікації, присутніх на них об'єктів [14]; розробка інформаційної технології підвищення просторової роздільної здатності багатовимірних фотограмметричних зображень [15]; метод пошуку схожих ділянок супутникових знімків на основі розробленого методу класифікації [16]; розробка автоматичного методу ідентифікації об'єктів на супутникових знімках високої просторової розрізненості [17]; автоматизація методу ідентифікації будівель на багатовимірних фотограмметричних зображеннях [18]; автоматичний метод ідентифікації та підрахунку дерев на супутникових знімках [19]; розробка методу класифікації супутникового знімка на основі систем нечіткого логічного виведення [20]; розробка технології дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової роздільної здатності [21];

вдосконалення методу компенсації тіні завдяки аналізу властивостей тіньових ділянок супутникових знімків [22].

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на семінарах кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара; на міжнародній науково-практичній конференції «Передові методи обробки аналізу космічної інформації» (03–04.12.2015, Дніпро, Україна); на міжнародному науково-практичному форумі «Наука і бізнес» (1.07.2016, Дніпро, Україна); на конференції International Young Scientists Forum on Applied Physics (10–14.10. 2016, Kharkiv, Ukraine); на конференції IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing (23–27.08.2016, Lviv, Ukraine); на міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (24–28.05.2016, Залізний Порт, Україна); на XVIII міжнародній науково-практичній конференції «Людина і космос» (6–8.04.2016, Дніпро, Україна); на X міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості та освіті» (14–15.12.2016, Дніпро, Україна); на конференції International Young Scientists Forum on Applied Physics (16–20.10. 2017, Lviv, Ukraine); на II Всеукраїнській науково-практичній конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем» (22–24.11.2017, Дніпро, Україна); на XIX міжнародній молодіжній науково-практичній конференції «Людина і космос» (12–14.04.2017, Дніпро, Україна); на III міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (1–3.11.2017, Дніпро, Україна); на II Всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології в моделюванні» (23–24.03.2017, Миколаїв, Україна); на міжнародній конференції з математичного моделювання МКММ-2018 (17–21.09.2018, Лазурне, Україна); на конференції IEEE 38th International Scientific and Technical Conference “Electronics and Nanotechnology” ELNANO 2018 (24–28.04.2018, Kyiv, Ukraine); на конференції IEEE 39th International Scientific and Technical Conference “Electronics and Nanotechnology” ELNANO 2019 (16–18.04.2019, Kyiv, Ukraine).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 22 наукових працях, 6 з яких індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus. П'ять статей опубліковано у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України, 1 стаття у періодичному іноземному науковому виданні, 16 – тези доповідей та матеріали конференцій, з них 8 – включено до міжнародних наукометричних баз.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, змісту, переліку умовних позначень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальним обсягом дисертації становить 184 сторінок друкованого тексту, що включає 58 рисунків, 11 таблиць, 3 додатки на 14 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 152. Список використаних джерел нараховує 120 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** дисертаційної роботи визначено актуальність обраної теми досліджень, об'єкт, предмет і мету наукової роботи, сформульовані завдання дослідження і методи, що використовувались для їх досягнення. Крім того, зазначено наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, перелічені конференції, на яких доповідались ці результати. Наведено публікації за темою роботи та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** розглянуто існуючі методи дешифрування, попередньої обробки, підвищення інформативності та геометричної корекції багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості. Порівняльний аналіз наведених у розділі методів дозволив встановити недоліки цих методів відносно супутникових знімків високої просторової розрізненості, отриманих сучасними системами ДЗЗ. На основі проведеного дослідження стану розвитку сфери обробки даних ДЗЗ та засобів їх отримання було сформульовано завдання дисертаційної роботи.

Другий розділ присвячений розробці технології дешифрування аерокосмічних зображень на основі об'єктно-орієнтованого підходу. Обґрунтовано вибір методу сегментації зображень високої просторової розрізненості, зокрема отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3.

На супутникових знімках, як правило, присутні декілька класів об'єктів та земного покриття, таких як рослинність, вода, ґрунт, будівлі, тіні, та дороги. Ці об'єкти можуть бути семантично описані, виходячи з їх фізичних характеристик. Об'єктно-орієнтований підхід дозволяє врахувати властивості, притаманні різним типам об'єктів та поверхонь. Наявність мультиспектральних каналів супутникових зображень дає можливість використовувати спектральну інформацію про об'єкти на знімках.

Схема запропонованої технології представлена на рис. 1. На етапі попередньої обробки виконується геометрична, радіометрична корекція та підвищення просторової роздільної здатності вхідних даних.

Для того, щоб отримати об'єкти для аналізу та дешифрування застосовується сегментація зображень. В роботі проведено дослідження ефективності різних методів сегментації стосовно їх використання при обробці фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості: метод зсуву середнього (Mean-shift), сегментація на основі методу К-середніх (K-means) та багатомасштабна сегментація (Multiresolution). За допомогою цих методів було оброблено декілька зображень, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3. Для отримання зручного для подальшого аналізу результату, було проведено покращення сегментації. Його суть полягає в тому, що якщо після обробки залишаються сегменти малого розміру, проводиться об'єднання цих сегментів з сусідніми сегментами.

Для класифікації сегментів супутникових зображень необхідно обчислити властивості сегментів. У роботі визначено, які властивості дозволяють провести ідентифікацію класів, що присутні на супутникових зображеннях. Для класифікації в роботі використовуються наступні групи властивостей об'єктів зображення:

Геометричні властивості: розмір, площа, довжина границі, компактність, прямокутність, довжина, ширина, відношення довжини границі до площі об'єкта.

Просторові властивості об'єктів, що описують взаємне розташування об'єктів зображення: наявність спільної границі, довжина спільної границі.

Спектральні властивості об'єктів: вегетаційний індекс NDVI, індекс ідентифікації водних поверхонь NDWI, нормалізований індекс ідентифікації тіні NSVDI, яскравість, насиченість та колір об'єкта у кольоровій моделі HSV.

Статистичні властивості об'єктів: середнє значення пікселів об'єкта, середньоквадратичне відхилення пікселів об'єкта.

Текстурні властивості об'єктів: яскравість контурів на границі сегмента, для її розрахунку було використано градієнтний фільтр Робертса.



Рис. 1. Головні етапи розробленої технології дешифрування зображення

Для прийняття рішення про класи сегментів зображення в роботі обрано модель, що базується на нечіткому логічному виведенні. У системах нечіткого логічного виведення рішення про клас об'єкта приймається на основі множини нечітких правил та нечіткої логіки. Правила сформовані з врахуванням фізичних властивостей кожного класу. Вхідною інформацією для систем нечіткого виведення є вектори властивостей сегментів. Класифікація зображення виконується на третьому етапі. На кожному з трьох етапів на вхід системи нечіткого логічного виведення по чергово подаються вектори властивостей кожного сегменту. Результати трьох етапів класифікації для фрагмента супутникового знімка показані

на рис. 2. Перелік класів, що були отримані, та кольори для їх позначення показано на рис. 6.

На першому етапі класифікації вхідний вектор X складається з чотирьох лінгвістичних змінних, кожна з яких відповідає наступним властивостям сегментів: x_1 – NDVI, x_2 – NSVDI, x_3 – СКВ, x_4 – NDWI. За значенням вихідної лінгвістичної змінної визначається, до якого з класів належить сегмент. Вона приймає значення з наступної терм-множини $d=\{\text{некласифіковані, тїнь, дерева, трава, вода}\}$. Результат першого етапу класифікації показано на рис. 3, результат другого етапу класифікації – на рис. 4, результат третього етапу класифікації – на рис. 5.



Рис. 2. Фрагмент супутникового знімка

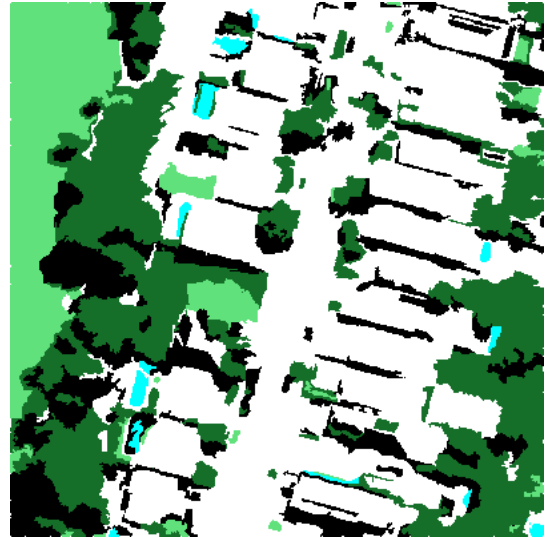


Рис. 3. Результат першого етапу класифікації

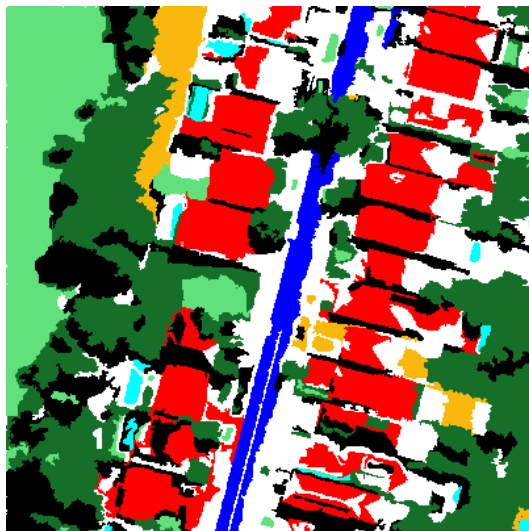


Рис. 4. Результат другого етапу класифікації

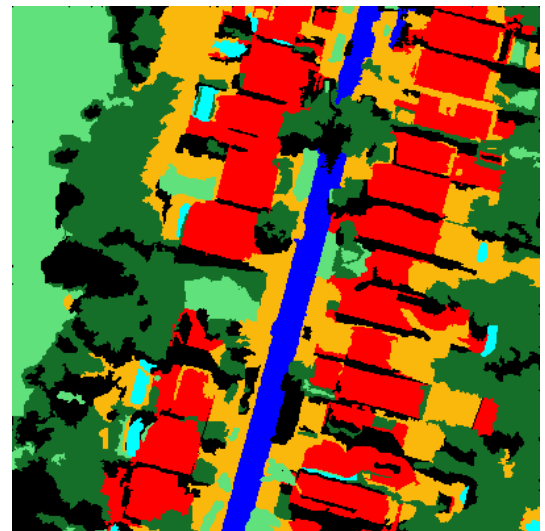


Рис. 5. Результат третього етапу класифікації

На другому етапі класифікації вхідний вектор X складається з восьми лінгвістичних змінних, кожна з яких відповідає наступним властивостям сегментів: x_1 – спільна границя з класом 4, x_2 – спільна границя з класом 3, x_3 – площа, x_4 – прямокутність, x_5 – компактність, x_6 – відношення ширини до довжини, x_7 –

контраст, x_8 – спільна границя з класом 5. Нечітка терм-множина вихідної змінної – $d = \{\text{некласифіковані, будівлі, дороги, ґрунт}\}$. Таким чином, для ідентифікації будинків, ґрунту та доріг використовується інформація про сегменти, що належать до класів “дерева”, “трава” та “тіні”, отримана на першому етапі класифікації.

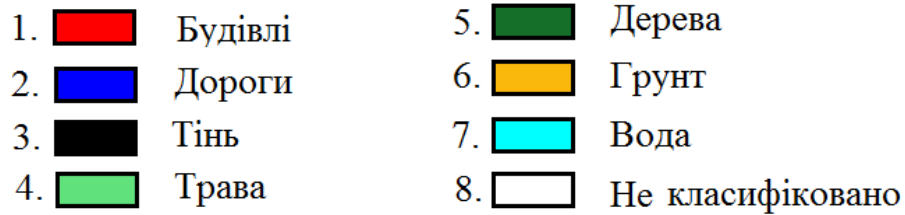


Рис. 6. Кольори для позначення результатів класифікації

На третьому етапі відбувається класифікація сегментів, що не були віднесені до жодного класу за своїми фізичними характеристиками. Їх клас визначається на основі їх положення, відносно сегментів з вже визначеними класами. Вхідний вектор X складається з чотирьох лінгвістичних змінних, кожна з яких відповідає наступним властивостям сегментів: x_1 – спільна границя з класом 4, x_2 – спільна границя з класом 3, x_3 – спільна границя з класом 1, x_4 – спільна границя з класом 2. Вхідні лінгвістичні змінні приймали значення з терм множини: $\{\text{низьке, середнє, високе}\}$. Нечітка терм-множина вихідної змінної – $d = \{\text{будівлі, дороги, тіні, трава, дерева ґрунт, вода}\}$.

Для оцінки результатів роботи методу для класифікованих зображень розраховано загальну точність O^c та індекс Каппа (K). Вони приймають значення з діапазону $[0,1]$. Чим вище значення оцінок, тим кращій результат класифікації. Оцінки розраховано для результатів класифікації, отриманих після використання трьох різних методів сегментації з різними параметрами. У таблиці 1 показані значення розрахованих оцінок точності класифікації O^c та індексу Каппа для фрагмента супутникового знімка.

Таблиця 1.

Оцінки точності класифікації

	Multiresolution	Mean-shift	K-means
K	0,9	0,76	0,85
O^c	0,94	0,69	0,8

Найкращі результати отримано при використанні методу багатомасштабної сегментації (Multiresolution) при значеннях параметру $h = [40..60]$, тому цей метод доцільно застосовувати при дешифруванні супутникових знімків високої просторової розрізненості. Продемонстровано, що результати класифікації мають достатньо високу точність і можуть бути використані для практичного застосування.

У третьому розділі розроблено технологію ідентифікації та компенсації тіней. Схема розробленої технології представлена на рис. 7. Вона складається з таких важливих етапів: ідентифікація тіні, компенсація тіні, обробка границь тіньових

сегментів. Тіні можуть бути корисними при дешифруванні супутникових зображень, але найчастіше вони заважають аналізу та ідентифікації певних об'єктів. Тому виникає потреба у обробці тіньових ділянок зображення. Задача компенсації тіні полягає у отриманні знімка, на якому тіні відсутні, тобто, освітленість тіньових ділянок має бути такою ж, як освітленість нетіньових ділянок.

Щоб визначити, який метод ідентифікації тіні найкраще підходить до застосування на знімках високої просторової розрізненості в роботі досліджено різні способи ідентифікації тіні. Для ідентифікації тіні виконується розрахунок наступних індексів та компонент зображення у інваріантних кольорових просторах: I , NSVDI, SDI, SDI_2 , $r(x)$, $r(x)_2$, V . Для знаходження бінарних масок тіні, що показують положення тіньових пікселів на зображенні, виконується бінаризація перерахованих індексів та компонент за пороговим значенням. Для знаходження оптимального порогу бінаризації використовується автоматичний метод Оцу.

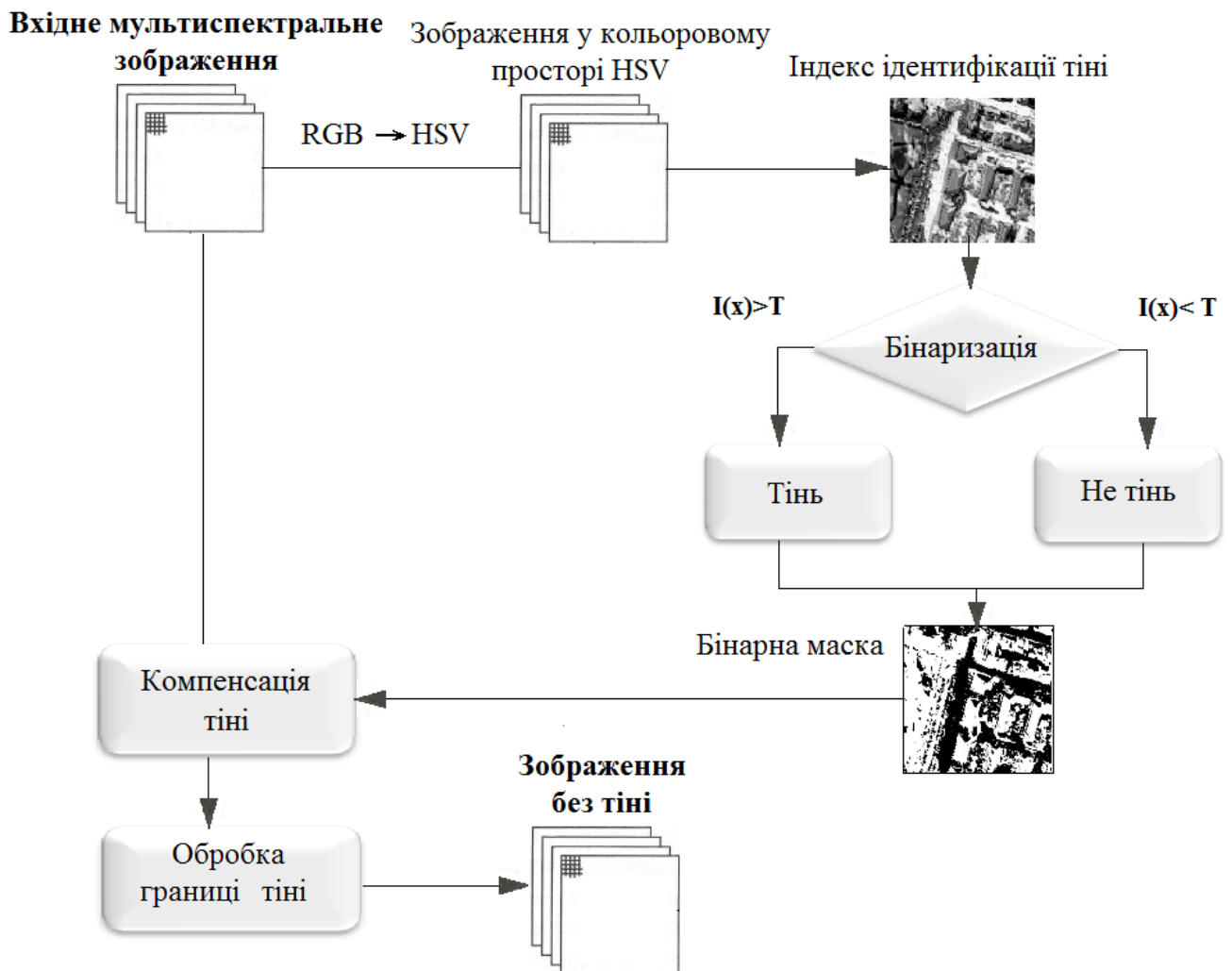


Рис. 7. Схема розробленої технології компенсації тіні

Фрагмент знімка, що оброблюється наведено на рис. 8. На рис. 9 показано спектральний індекс NSVDI, гістограму індекса NSVDI показано на рис. 10. Вісь абсцис на гістограмі відповідає значенням пікселів, а вісь ординат частоті з якою

зустрічається кожне значення. Знайдений за методом Оцу оптимальний поріг, відмічений червоною лінією. Для візуалізації значення пікселів отриманих індексів (I , $NSVDI$, SDI , SDI_2 , $r(x)$, $r(x)_2$, V) приведені до діапазону значень $[0, 255]$. Для усіх індексів та компонент зображення чим нижче значення пікселя, тим більша ступінь його належності до тіні, тому, частина гістограми, що відповідає нижчим значенням пікселів, інтерпретується як тінь. Після розбиття гістограм індексів (I , $NSVDI$, SDI , SDI_2 , $r(x)$, $r(x)_2$, V) за оптимальним порогом було отримано бінарні маски тіні. На рис. 11 показано бінарну маску тіні, отриману по індексу $NSVDI$.



Рис. 8. Фрагмент супутникового знімка



Рис. 9. Зображення спектрального індексу $NSVDI$

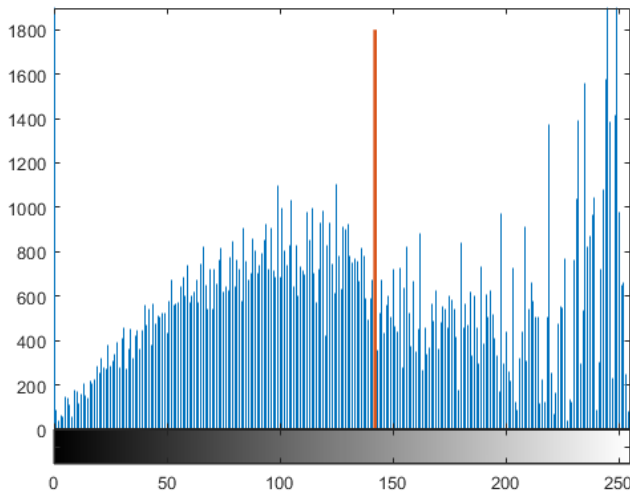


Рис. 10. Гістограма індексу $NSVDI$



Рис. 11. Бінарна маска тіні, отримана по індексу $NSVDI$

Для оцінки точності ідентифікації тіні використано оцінки, що застосовуються для порівняння бінарних класифікаторів. Отримані у результаті бінаризації маски тіні порівнюються з еталонною маскою тіні. Для вирішуваної задачі, пікселі що належать тіні, позначаються за позитивні (*positive*), а решта пікселів як негативні

(negative). Отримані у результаті ідентифікації пікселі поділяються на наступні множини:

- True Positives (TP): тіньові пікселі, які були вірно ідентифіковані як тіньові.
- True Negatives (TN): нетіньові пікселі, які були вірно ідентифіковані як нетіньові.
- False Positives (FP): нетіньові пікселі, що помилково ідентифіковані як тіні.
- False Negatives (FN): тіньові пікселі, які були ідентифіковані як нетіньові.

За цими даними можна розрахувати метрики якості precision (точність), recall (повнота), specificity (специфічність) та accuracy (точність по всім пікселям):

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \quad Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (1)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, \quad Specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (2)$$

F-метрика, що є гармонійним середнім між точністю та повнотою:

$$F_1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, \quad F_1 \in [0,1]. \quad (3)$$

Intersection Over Union (IOU) – відношення між перетином еталонних та ідентифікованих як тіні пікселів та загальною кількістю пікселів:

$$IOU = \frac{TP}{TP + FP + FN}. \quad (4)$$

Усі наведені метрики приймають значення у діапазоні [0,1]. Чим вище значення метрики, тим кращий результат ідентифікації. У таблиці 2 приведені результати розрахунків метрик для масок тіні, отриманих в результаті бінаризації спектральних індексів та компонент зображення у інваріантних кольорових просторах: I, NSVDI, SDI, SDI₂, r(x), r(x)₂, V.

Таблиця 2.

Результат розрахунку метрик якості ідентифікації тіні

	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>Specificity</i>	<i>Accuracy</i>	<i>F₁</i>	<i>IOU</i>
I (intensity)	0,6841	0,9898	0,5927	0,7798	0,8091	0,6794
NSVDI	0,9974	0,923	0,9978	0,9626	0,9587	0,9208
SDI ₂	0,6452	0,9927	0,5135	0,7393	0,7821	0,6422
r ₂ (x)	0,5518	0,931	0,3257	0,6112	0,6931	0,5303
V (value)	0,9794	0,6988	0,9835	0,833	0,8156	0,6887
SDI	0,6462	0,981	0,5214	0,738	0,7792	0,6383
r(x)	0,6858	0,8591	0,6492	0,7481	0,7627	0,6165

Найвищі значення метрик досягнуті для маски, отриманої у результаті бінаризації спектрального індексу NSVDI. Виходячи з отриманих результатів, цей індекс використовується у розробленій технології на етапі ідентифікації тіні.

Після отримання бінарної маски тіні проводиться компенсація тіні у отриманих тінювих ділянках зображення. Для покращення освітленості у тінювих ділянках застосовується модель утворення тіні, яка базується на фізичних принципах розповсюдження сонячного випромінювання. Модель описує, скільки світла потрапляє на кожен піксель зображення. Модель включає два типи випромінювання: падаюче випромінювання – коли випромінювання від джерела світла потрапляє прямо на об'єкт; відбите випромінювання – коли об'єкт освітлений променями, що відбилися від оточуючих об'єктів. Нетінюві ділянки освітлені обома типами випромінювання, тінюві – лише відбитим випромінюванням. Модель освітленості пікселя зображення представляється формулою:

$$I(x) = R(x) \cdot L(x), \quad (5)$$

де $I(x)$ – значення пікселя x , $L(x)$ – освітленість відповідного пікселя та $R(x)$ – кількість відбитого пікселем світла.

Освітленість пікселя може бути представлена як сума падаючого та відбитого випромінювання:

$$L(x) = L_D(x) + L_R(x). \quad (6)$$

З (5) та (6) отримуємо вирази освітленості для тінювих та нетінювих ділянок зображення:

$$I_{lit}(x) = R(x) \cdot L_D(x) + R(x) \cdot L_R(x), \quad I_{shd}(x) = \eta(x) \cdot L_R(x) \cdot R(x), \quad (7)$$

де $\eta(x)$ – множник, що враховує послаблення відбитого випромінювання у тіні.

За формулами (7), отримуємо нові значення для пікселів у тінювих ділянках:

$$I_C(x) = R(x) \cdot L_D(x) + \frac{1}{\eta(x)} \cdot I_{shd}(x), \quad (8)$$

$$I_C(x) = A(x) + \gamma(x) \cdot I_{shd}(x), \quad (9)$$

де параметри A та γ розраховуються наступним чином:

$$A(x) = \mu(B) - \gamma \cdot \mu(S), \quad \gamma(x) = \frac{1}{\eta(x)} = \frac{\sigma(B)}{\sigma(S)}, \quad (10)$$

де $\mu(B)$ та $\mu(S)$ – середні значення пікселів у нетінювих та тінювих ділянках відповідно, $\sigma(S)$ та $\sigma(B)$ – стандартні відхилення пікселів у тінювих та нетінювих ділянках, $I_C(x)$ – нові значення окремих пікселів у тінювих ділянках.

До усіх тінювих пікселів застосовується формула (9), параметри A та γ розраховуються за значеннями пікселів у тінювих ділянках. На рис. 12 показано результат застосування методу компенсації тіні до супутникового зображення.

Метод компенсації тіні вдосконалено за рахунок додавання процедури пошуку парних тінювих та нетінювих ділянок та обробки границь тінювих ділянок зображення. На основі дослідження властивостей тіней у метод впроваджено пошук ділянок, що належать до одного типу поверхонь. Якщо для окремого тінювого сегмента існує відповідний нетінювий сегмент, то параметри для обробки тінювого сегмента розраховуються по середнім значенням та стандартним відхиленням цієї пари.



Рис. 12. Супутникове зображення після компенсації тіні

У четвертому розділі вдосконалено метод геометричної корекції спотворень, що виникають при отриманні аерокосмічних сканерних зображень високої просторової розрізненості.

Більшість сучасних аерокосмічних систем ДЗЗ, зокрема супутники WorldView-2 та WorldView-3, оснащено поздовжніми ПЗЗ-сканерами. Такі сканери мають одну або декілька лінійок детекторних елементів. Зображення отримується шляхом послідовного сканування земної поверхні лінійкою детекторних елементів перпендикулярно напрямку руху космічного апарату. Зображення складається з окремих сканованих ліній, які послідовно суміщаються між собою.

При отриманні зображень поздовжнім ПЗЗ-сканерами, виникають систематичні та несистематичні викривлення викликані тим, що кожна сканована лінія отримана незалежно від попередньої, геометричні параметри космічного апарату у момент зйомки кожної лінії можуть змінюватись. Під час руху системи ДЗЗ виникають геометричні викривлення, спричинені нестабільністю положення платформи аерокосмічного апарату у просторі, зміною швидкості та висоти. Особливо це помітно на зображеннях, на яких є лінійні об'єкти. На рис. 13, а) показано фрагмент аерокосмічного знімка, отриманого поздовжнім ПЗЗ-сканером. Зображення не пройшло жодної геометричної корекції, на ньому присутні кутові, масштабні та панорамні викривлення. На рис. 13, б) показано зображення тієї ж самої місцевості, отримане у інший час після геометричної корекції. Зображення, отримані з літака, що проводить аерозйомку, обладнаного мультиспектральним ПЗЗ-сканером. Висота польоту знімального апарату 800 метрів, просторове розрізнення приблизно 0,6 м.

У вдосконаленому в роботі методі для геометричної корекції зображення використовуються наземні контрольні точки (НКТ) та лінійні об'єкти. У якості еталонного зображення береться знімок, на якому більшість викривлень вже усунена, це може бути панхроматичне або мультиспектральне зображення тієї ж

місцевості, отримане одночасно або у інший час. Бажано, щоб просторова роздільна здатність еталонного зображення була вища або така сама, як на оброблюваному зображенні. Для корекції зображення на еталонному та оброблюваному зображенні обираються НКТ.



Рис. 13. Некоректоване зображення, отримане поздовжнім ППЗ-сканером (а); зображення, яке пройшло геометричну корекцію (б)

Для корекції ефекту зсуву сканованих ліній, викликаного нахилом космічного апарату, використовуються лінійні об'єкти, які простягаються вздовж всього зображення, яке оброблюється. Ці об'єкти повинні бути простягнутої форми та невеликої ширини, і можуть бути інтерпретовані як лінії. Вхідними даними у реалізованому методі є набір координат НКТ та лінійні елементи, виділені на некоректованому та еталонному зображеннях (рис. 14, а), 14, б)). На відміну від виділення НКТ, які можуть бути обрані вручну, точне виділення лінійних об'єктів зображення – дуже трудомісткий процес, тому в роботі реалізовано автоматизовану ідентифікацію лінійних об'єктів зображення.

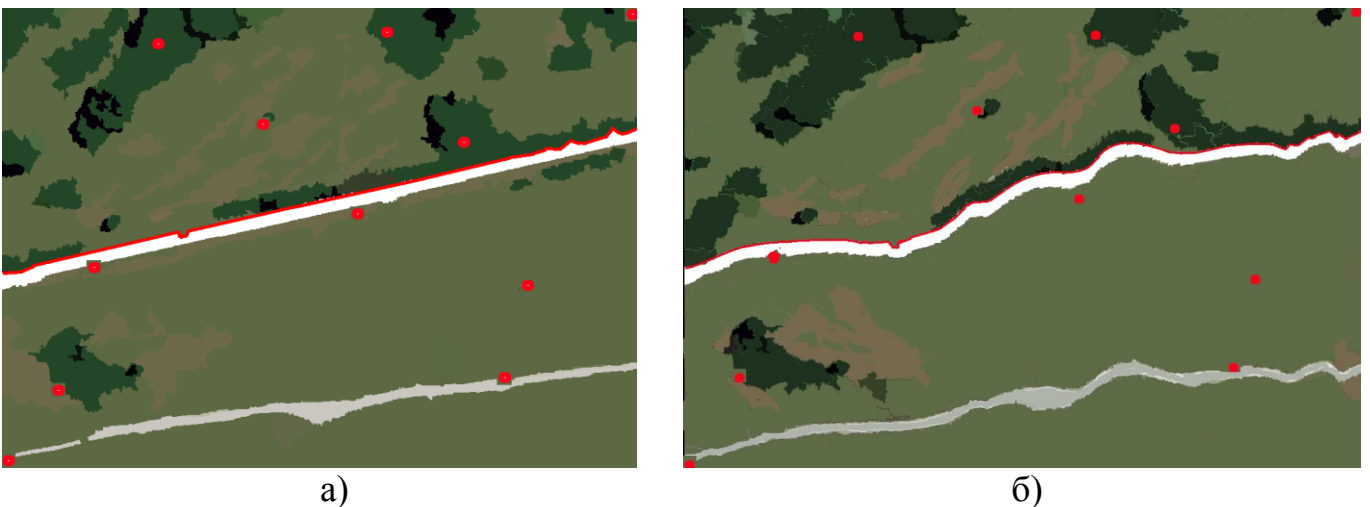


Рис. 14. Результат класифікації та виділення НКТ та лінійних об'єктів на контрольному (а) та на некоректованому (б) зображеннях

Для ідентифікації лінійних об'єктів до еталонного та некоректованого зображень застосовується розроблена технологія дешифрування зображень. В результаті, проводиться сегментація та класифікація зображень. Для геометричної корекції необхідно мати лінійний елемент шириною в один піксель, що проходить через весь оброблюваний фрагмент у напрямку польоту знімального апарату. На зображеннях, показаних на рис. 14, а), б) було взято сегмент, що відповідає об'єкту класу “дорога”, було виділено границі сегмента. Для корекції використовувалась границя сегмента, що позначена на рис. 14, а), б) червоним. Спочатку зображення масштабується вздовж осей y та x . На рис. 14, а), б) вісь x відповідає напрямку руху космічного апарату, а вісь y відповідає напрямку перпендикулярному руху. Розраховуються масштабуючі параметри X_M та Y_M . Через те, що швидкість космічного апарату непостійна, масштабуючий параметр по осі x – X_M може змінюватись вздовж всього зображення. Параметри зовнішнього орієнтування космічного апарату не змінюються миттєво, тому можна вважати їх незмінними у певному проміжку часу. Беруться лінії зображення у напрямку зйомки, між i та $i+1$ контрольними точками. Параметр $X_M(i)$ у межах точок i та $i+1$ незмінний і визначається як:

$$X_M(i) = \frac{X_E(i+1) - X_E(i)}{X_T(i+1) - X_T(i)}, \quad (11)$$

де $X_E(i)$ та $X_T(i)$ – координата i -ї контрольної точки за віссю x , відповідно, на еталонному та трансформованому зображеннях.

Масштабування вздовж осі x дозволяє усунути викривлення, спричинені зміною швидкості космічного апарату. Вздовж осі y зображення може мати панорамні або масштабні викривлення. Для того щоб їх уникнути, виконується масштабування по осі y , аналогічно масштабуванню по осі x :

$$Y_M(i) = \frac{Y_E(i+1) - Y_E(i)}{Y_T(i+1) - Y_T(i)}, \quad (12)$$

де $Y_E(i)$ та $Y_T(i)$ – координата i -ї контрольної точки за віссю y , відповідно, на еталонному та трансформованому зображеннях.

Коли зображення приведені до одного масштабу, компенсується ефект, викликаний кутівими викривленнями. Після масштабування по осям x та y виділений лінійний елемент на еталонному та трансформованому зображеннях має однакову довжину між НКТ. Кожній сканованій лінії зображення відповідає одна координата лінійного елемента, тоді можливо розрахувати зсув ліній трансформованого зображення відносно еталонного:

$$T_y^{\text{new}} = E_y - T_y, \quad (13)$$

де T_y та E_y – координати лінійного об'єкта по осі y на трансформованому та еталонному зображеннях, відповідно.

В наслідок геометричного трансформування границі зображення стають нерівними, що спричинено зсувом ліній в процесі корекції. Результат геометричної корекції показаний на рис. 15.



Рис. 15. Результат геометричної корекції аерокосмічного сканерного зображення

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні розв'язано важливу науково-прикладну задачу підвищення рівня автоматизації, точності та швидкодії попередньої обробки, аналізу та дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості. Практичні результати створюють передумови для вирішення прикладної проблеми інтерпретації відеоінформації, отриманої дистанційними засобами.

Отримано наступні основні результати, які мають наукову новизну та практичну цінність:

1. Розроблено нову технологію дешифрування супутникових зображень високої просторової розрізненості на основі об'єктно-орієнтованого підходу, який дозволяє отримати класифіковане зображення земної поверхні та виділити на ній різні типи об'єктів. Реалізовано систему нечіткого логічного виведення, яка, на основі розрахованих властивостей сегментів зображення, відносить їх до одного з класів.

2. Для вирішення задачі дешифрування супутникових знімків високої просторової розрізненості досліджено методи сегментації цифрових зображень "Mean-shift", "K-means" та "Multiresolution". Найкращі результати отримані при використанні на етапі сегментації методу "Multiresolution" при значеннях параметру $h=[40..60]$, тому цей метод доцільно застосовувати при дешифруванні супутникових знімків високої просторової розрізненості.

3. Досліджено наступні типи властивостей зображень: геометричні, статистичні, текстурні, спектральні та просторові. Продемонстровано, що ці властивості доцільно комплексно використовувати для аналізу супутникових зображень високої просторової розрізненості, ідентифікації об'єктів, що належать до окремих класів, та для класифікації всього зображення.

4. Розроблено нову технологію ідентифікації та компенсації тіней, що базується на фізичних принципах виникнення тіні на фотограмметричних зображеннях. Метод компенсації тіні вдосконалено на основі дослідження

властивостей тіней у інваріантному кольоровому просторі HSV. Опираючись на результати дослідження, у метод впроваджено пошук ділянок, що належать до одного типу поверхонь.

5. Досліджено різні способи ідентифікації тіні. Тіні ідентифіковано на основі наступних індексів та компонент зображення у інваріантних кольорових просторах: I, NSVDI, SDI, SDI₂, r(x), r(x)₂, V. Перераховані індекси та компоненти було бінаризовано за пороговим значенням. За розрахунком оцінок точності ідентифікації тіні визначено, що для поставленої задачі доцільно використовувати індекс ідентифікації тіні NSVDI. Реалізовано метод ідентифікації тіні, в якому для автоматичного знаходження оптимального порогу бінаризації використовувався метод Оцу.

6. Вдосконалено метод геометричної корекції фотограмметричного сканерного зображення за допомогою автоматизації виділення лінійних об'єктів. Реалізовано метод геометричної корекції викривлень аерокосмічних зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами.

7. Розроблене на базі запропонованих методів та технологій програмне забезпечення дозволяє в автоматизованому режимі проводити аналіз та дешифрування супутникових знімків з мінімальними витратами обчислюваних ресурсів та часу, та впроваджено в ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» та «Дніпрокосмос» філії Національного центру управління та випробувань космічних засобів Державного космічного агентства України.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Shedlovska Y.I., Hnatushenko V.V.** Shadow Detection and Removal from Urban High Resolution Remote Sensing Images. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Інформаційні системи та мережі. 2016. № 854. С. 42–49.

(Наукове фахове видання України. Індексується у Index Copernicus, Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)). Особистий внесок: розробка технології компенсації тіні на багатовимірних супутникових знімках високої просторової розрізненості.

2. Гнатушенко В.В., Обиденний Є.О., **Шедловська Я.І.** Алгоритм ідентифікації будинків на супутникових зображеннях. *Праці Таврійського державного агротехнологічного університету*. 2016. Т. 2, № 6. С. 157–162.

(Наукове фахове видання України. Індексується у Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)). Особистий внесок: дослідження та розрахунок властивостей зображення, за якими можуть бути ідентифіковані будинки.

3. Гнатушенко В.В., **Шедловська Я.І.** Розрахунок властивостей зображення для порівняння супутникових знімків високої просторової роздільної здатності. *Сучасні проблеми моделювання*. 2017. Вип. 10. С. 51–58.

(Наукове фахове видання України. Індексується у Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)). Особистий внесок: аналіз супутникових знімків

високої просторової розрізненості на основі властивостей, присутніх на них об'єктів.

4. Гнатушенко В.В., Шедловська Я.І. Тематична класифікація супутникових знімків високої просторової роздільної здатності. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2018. Т. 2, №3(66). С. 130–136.

(Наукове фахове видання України. Індексується у Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky)). Особистий внесок: розробка технології класифікації супутникових знімків високої просторової роздільної здатності.

5. Shedlovska Y.I., Hnatushenko V.V. Visual search algorithm for high resolution satellite imagery. *Системні технології*. 2017. No. 5 (112). P. 18–25.

(Наукове фахове видання України. Індексується у Index Copernicus, Google Scholar, National Library of Ukraine (Vernadsky), Ulrichsweb Global Serials Directory, WorldCat). Особистий внесок: розрахунок властивостей об'єктів зображення для подальшого їх використання в методі класифікації.

6. Shedlovska Y.I. Computer technology of images geometric correction. *SWorldJornal*. 2020. Issue 6. Part 6. P. 47–52.

(Стаття у закордонному періодичному журналі. Індексується у Index Copernicus, Google Scholar).

Додаткові публікації:

7. Шедловская Я.И., Гнатушенко В.В. Распознавание зданий на спутниковых снимках на основе объектно-ориентированного подхода. *Международная научно-практическая конференция «Передовые методы обработки анализа космической информации»*. 3–4 декабря 2015. Днепропетровск, Украина. Тезисы докладов конференции. 2015. С. 90–93.

Особистий внесок: ідентифікація будинків на супутникових знімках, на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

8. Шедловская Я.И. Компенсация теней на основе модели освещенности изображения. *Международный научно-практический форум «Наука и бизнес»*. 1 июля 2016, Днепр, Украина. Тезисы докладов форума. 2016. С. 102–104.

9. Shedlovska Y.I., Hnatushenko V.V. Shadow Removal Algorithm With Shadow Area Border Processing. *International Young Scientists Forum on Applied Physics*. October, 10 – 14, 2016. Kharkiv, Ukraine. Proceedings. 2016. P. 164–167.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: покращення методу компенсації тіней на супутникових знімках шляхом додавання процедури обробки границі тіньових ділянок.

10. Shedlovska Y.I., Hnatushenko V.V. Shadow Detection and Removal Using a Shadow Formation method. *IEEE First International Conference on Data Stream Mining & Processing*. August, 23 – 27, 2016. Lviv, Ukraine. Proceedings. 2016. P. 187–190.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: розробка методу ідентифікації міні та компенсації тіней на супутникових знімках високої просторової розрізненості.

11. Шедловская Я.И., Гнатушенко В.В. Идентификация и компенсация теней на аэрокосмических снимках сверхвысокого пространственного разрешения. *Международная научная конференция «Интеллектуальные системы принятия*

решений и проблемы вычислительного интеллекта», 24–28 мая 2016. Железный Порт, Украина. Материалы конференции. 2016. С. 324–326.

Особистий внесок: розробка методу ідентифікації тіні з використанням автоматичного пошуку оптимального порогу бінаризації.

12. **Шедловская Я.И.**, Гнатушенко В.В. Компенсация теней на мультиспектральных спутниковых снимках высокого пространственного разрешения [Электронный ресурс]: XVIII Международная научно-практическая конференция «Человек и космос», 6–8 апреля 2016. Днепропетровск, Украина. Сборник тезисов. 2016. С. 363. 1 электрон.опт. диск (CD-R).

Особистий внесок: автоматизація методу компенсації тіні на супутникових знімках.

13. **Шедловська Я.І.** Алгоритм класифікації об'єктів на супутниковому знімку. X Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті в промисловості та освіті», 14–15 грудня 2016. Дніпро, Україна. Тези доповідей. 2016. С. 71.

14. **Shedlovska Y. I.**, Hnatushenko V. V., Kashtan V. J. Satellite Imagery Features for the Image Similarity Estimation. *International Young Scientists Forum on Applied Physics*. October, 16 – 20, 2017. Lviv, Ukraine. Proceedings. 2017. P. 359–362.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: дослідження властивостей супутникових знімків, що можуть бути використані для аналізу та класифікації присутніх на них об'єктів.

15. Kashtan V.J., Hnatushenko V.V., **Shedlovska Y.I.** Processing Technology of Multispectral Remote Sensing Images. *International Young Scientists Forum on Applied Physics*. October, 16 – 20, 2017. Lviv, Ukraine. Proceedings. 2017. P. 355–358.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: розробка інформаційної технології підвищення просторової роздільної здатності багатоканальних фотографічних зображень.

16. **Шедловська Я.І.**, Гнатушенко В.В. Пошук схожих ділянок земної поверхні на супутникових знімках. II Всеукраїнська науково-практична конференція «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформаційних та комп'ютерних систем». 22–24 листопада 2017. Дніпро, Україна. Тези доповідей. 2017. С. 21–22.

Особистий внесок: метод пошуку схожих ділянок супутникових знімків на основі розробленого методу класифікації.

17. **Шедловська Я.І.**, Гнатушенко В.В. Алгоритм класифікації об'єктів на супутниковому знімку високої просторової роздільної здатності [Електронний ресурс]: XIX Міжнародна молодіжна науково-практична конференція «Людина і космос», 12–14 квітня 2017. Дніпро, Україна. Збірник тез. С. 332. 1 электрон.опт. диск (CD-R).

Особистий внесок: розробка автоматичного методу ідентифікації об'єктів на супутникових знімках високої просторової розрізненості.

18. Гнатушенко В.В., Обиденний Є.О., Соколова Н.О., **Шедловська Я.І.** Інформаційна система попередньої обробки та розпізнавання будівель на багатоканальних аерокосмічних знімках. III Міжнародна науково-технічна конференція «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем». 1–3 листопада 2017. Дніпро, Україна. Матеріали конференції. 2017. С. 185–187.

Особистий внесок: автоматизація методу ідентифікації будівель на багатоканальних фотограмметричних зображеннях.

19. **Шедловська Я.І.**, Гнатушенко В.В. Автоматизація підрахунку дерев на супутникових знімках. *II Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Інформаційні технології в моделюванні»*. 23–24 березня 2017. Миколаїв, Україна. Збірник матеріалів конференції. 2017. С. 53–54.

Особистий внесок: автоматичний метод ідентифікації та підрахунку дерев на супутникових знімках.

20. Гнатушенко В. В., **Шедловська Я.І.** Алгоритм класифікації зображень отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3. *Міжнародна конференція з математичного моделювання МКММ-2018*. 17–21 вересня, 2018. Лазурне, Україна. Збірник матеріалів конференції. 2018. С. 106.

Особистий внесок: розробка методу класифікації супутникового знімка на основі систем нечіткого логічного виведення.

21. **Shedlovskya Y.I.**, Hnatushenko V.V. A Very High Resolution Satellite Imagery Classification Algorithm. *IEEE 38th International Scientific and Technical Conference “Electronics and Nanotechnology” ELNANO 2018*. April 24–28, 2018. Kyiv, Ukraine. Proceedings. 2018. P. 654–657.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: розробка технології дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової роздільної здатності.

22. **Shedlovskya Y.I.**, Hnatushenko V.V. A Shadow Removal Algorithm for Remote Sensing Imagery. *IEEE 39th International Scientific and Technical Conference “Electronics and Nanotechnology” ELNANO 2019*. April 16–18, 2019. Kyiv, Ukraine. Proceedings. 2019. P. 817–821.

(Індексується в Scopus). Особистий внесок: вдосконалення методу компенсації тіні завдяки аналізу властивостей тіньових ділянок супутникових знімків.

АНОТАЦІЯ

Шедловська Я.І. Дешифрування та аналіз багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.01.01 «Прикладна геометрія, інженерна графіка». – Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, Мелітополь, 2021.

У дисертаційній роботі розв’язана важлива науково-прикладна задача підвищення ефективності методів попередньої обробки, аналізу та дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, зокрема даних дистанційного зондування Землі.

Розроблено нову технологію дешифрування багатовимірних супутникових зображень на основі об’єктно-орієнтованого підходу, яка дозволяє проводити класифікацію, аналіз та ідентифікацію окремих об’єктів земної поверхні за допомогою розрахунку їх властивостей. Запропоновано геометричні, просторові,

спектральні, текстурні та статичні властивості для ідентифікації різних типів об'єктів земної поверхні. У результаті порівняльного аналізу різних методів сегментації з'ясовано, що при дешифруванні багатомірних супутникових зображень високої просторової розрізненості найбільш ефективним є метод багатомасштабної сегментації.

У роботі розроблено технологію ідентифікації та компенсації тіні на багатомірних супутникових зображеннях високої просторової розрізненості. У розробленій технології метод компенсації тіні базується на моделі утворення тіні, що враховує фізичні принципи розповсюдження сонячного випромінювання. Метод компенсації тіні покращено за рахунок додавання пошуку ділянок, що належать до одного типу поверхонь, та обробки границь тінювих ділянок.

Через особливості конструкції аерокосмічних сканерних систем геометрія зйомки таких зображень відрізняється від геометрії зйомки кадрових знімків. У роботі вдосконалено метод геометричної корекції сканерних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості. Для геометричної корекції використано наземні контрольні точки та лінійні об'єкти зображення. Запропоновано автоматизовану ідентифікацію лінійних об'єктів зображення на основі розробленої технології дешифрування.

Ключові слова: геометрична корекція, фотограмметричне зображення, дешифрування, класифікація, компенсація тіні, ідентифікація, сегментація.

АННОТАЦИЯ

Шедловская Я.И. Дешифрирование и анализ многомерных фотограмметрических изображений высокого пространственного разрешения.
– *На правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.01.01 «Прикладная геометрия, инженерная графика». – Мелитопольский государственный университет имени Богдана Хмельницкого, Мелитополь, 2021.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная задача повышения эффективности методов предварительной обработки, анализа и дешифрирования многомерных фотограмметрических изображений высокого пространственного разрешения, в частности данных дистанционного зондирования Земли.

Разработана новая технология дешифрирования многомерных спутниковых снимков на основе объектно-ориентированного подхода, которая позволяет проводить классификацию, анализ и идентификацию объектов земной поверхности при помощи расчета их свойств. Для идентификации разных типов объектов используются геометрические, пространственные, спектральные, статистические и текстурные свойства. В результате сравнительного анализа разных методов сегментации, выяснено, что при дешифрировании многомерных спутниковых изображений высокого пространственного разрешения наиболее эффективен метод многомасштабной сегментации.

В работе разработана технология идентификации и компенсации тени на многомерных спутниковых изображениях высокого пространственного разрешения.

В разработанной технологии метод компенсации тени основан на модели формирования тени, которая учитывает физические принципы распространения излучения. Метод компенсации тени был улучшен за счет поиска парных участков, которые относятся к одному типу поверхностей и обработки границ теневых участков.

Современные системы дистанционного зондирования оборудованы сканерами, позволяющими получать многомерные изображения земной поверхности. Из-за особенностей конструкции сканерных систем, на изображениях возникают геометрические искажения. В работе усовершенствован метод геометрической коррекции аэрокосмических сканерных изображений. Для геометрической коррекции используются наземные контрольные точки и линии. Для автоматизации идентификации линий на изображениях используется разработанная технология дешифрирования.

Ключевые слова: геометрическая коррекция, фотограмметрическое изображение, дешифрирование, классификация, компенсация тени, идентификация, сегментация.

ABSTRACT

Shedlovska Y. I. High spatial resolution multidimensional photogrammetric imagery interpretation and analysis. – Manuscript.

Thesis for a Doctor of Philosophy degree in technical science in specialty 05.01.01 «Applied geometry, engineering graphics». – Bogdan Khmelnytsky Melitopol State Pedagogical University, Melitopol, Ukraine, 2021.

This dissertation work is concerned with the important scientific and applied problem of increasing the efficiency of methods for the preprocessing, analysis, and interpretation of multidimensional photogrammetric high spatial resolution images, including Earth remote sensing data. A new object-oriented technology for multidimensional satellite imagery interpretation, which allows one to obtain classified images of the Earth surface, was developed. The developed algorithm allows one to analyze and identify individual objects of the Earth surface by calculating their features. To identify various types of objects, geometric, spatial, spectral, texture, and static features were proposed.

The developed technology consists of the following stages: image preprocessing, image segmentation, segmentation enhancement, segment feature calculation, and image classification. At the preprocessing stage, radiometric correction and spatial resolution enhancement were performed. At the segmentation stage, various segmentation methods that are used in multidimensional image decoding and analysis were applied to the input data: mean-shift segmentation, multiresolution segmentation, and K-means based segmentation. The analysis results show that multiresolution segmentation is the most efficient segmentation method for high spatial resolution multidimensional satellite images. Segmentation enhancement was performed to make the segmentation result more convenient for further analysis. If after image segmentation segments of too small size remained, which impeded further analysis, segmentation enhancement merged those segments with their neighboring ones.

To make a decision on the segment class, a fuzzy logic model was built. In fuzzy logic systems, a decision on the segment class is made on the basis of a fuzzy rule set and fuzzy logic. The rules were built according to the physical features of each class. The set of the classes that were identified by the developed technology is as follows: buildings, roads, trees, grass, shadow, water, and ground. The vectors of segment features were used as the input data for the fuzzy logic system. The features were calculated for all image objects obtained at the segmentation stage.

In the dissertation work, a shadow detection and removal technology for multidimensional high-resolution satellite imagery was developed. The problem of shadow removal consists in obtaining an image without shadows, i. e., the illuminance of the shadow regions must be the same as that of the rest of the image. For this purpose, the shadow regions must be processed. To implement shadow removal and to obtain a shadow-free image, the following problems were solved: shadow identification, shadow removal, and shadow segment border processing.

Shadows were identified on the basis of the following shadow spectral indices and image components in invariant color spaces: I, NSVDI, SDI, SDI_2 , $r(x)$, $r(x)_2$, and V. The above indices and components were binarized by the threshold value. For the binarization threshold to be determined automatically, the Otsu method was used. To find out which of the shadow identification method was best suited to multidimensional photogrammetric images, accuracy estimates for shadow identification with the help of the indices and image components were calculated. As a result, it was found that the NSVDI shadow identification index was best suited to the problem under consideration.

In the developed technology, the shadow removal method is based on a shadow formation model that takes into account the physical principles of light scattering and reflection. The developed realization of the shadow removal method was successfully applied to high-resolution multidimensional satellite imagery. The developed method of shadow removal was enhanced by adding a paired region search procedure and a shadow region border processing procedure. A search for paired shadow and non-shadowed regions that belong to the same type of surfaces improves the quality of the shadow detection and removal.

A method of geometric transformation of high spatial resolution aerospace imagery was refined. Today's Earth remote sensing systems are equipped with scanner systems that can capture multidimensional images of the Earth surface. Because of the design features of scanner systems, the geometry of this type of imaging differs from the geometry of conventional photography. To make a correction by geometric transformation, ground control points and linear image objects were used. An automatic identification of image linear objects based on the developed decoding algorithm was proposed.

Keywords: geometric transformation, photogrammetric image, interpretation, classification, shadow removal, identification, segmentation.

Підписано до друку 12.03.2021
Формат 30x42/4 Др. арк. 1.6 лист. з 2-х сторін
Тираж 100 пр. Зам. № 47
Центр оперативної поліграфії ТОВ “ВПІ-ІНВЕСТ”
Довідка АА № 651053 КВЕД-2010 18.13
Виготовлення друкарських форм і надання поліграфічних послуг від 03.09.2012
Адреса оперативної поліграфії:
вул. О. Гончара 4, Дніпро, 49600