

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МЕЛІТОПОЛЬСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ПЕДАГОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ БОГДАНА ХМЕЛЬНИЦЬКОГО

Кваліфікаційна наукова
праця на правах
рукопису

Шедловська Яна Ігорівна

УДК 004.932:514.18

ДИСЕРТАЦІЯ
ДЕШИФРУВАННЯ ТА АНАЛІЗ БАГАТОВИМІРНИХ
ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ВИСОКОЇ
ПРОСТОРОВОЇ РОЗРІЗНЕНОСТІ

05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

05 – Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



... І. Шедловська

Науковий керівник Гнатушенко Володимир Володимирович, доктор
технічних наук, професор

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 багатовимірних супутникових зображень високої просторової розрізненості найбільш ефективним є метод багатомасштабної сегментації.

У роботі розроблено технологію ідентифікації та компенсації тіні на багатовимірних 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 тіньових 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 Khmelnsky 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.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковано 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. Індується 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. Індується 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. Індується 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. Днепрпетровск, 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 тіні 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 електрон.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 фотোগрамметричних 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 електрон.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. **Shedlovska 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. **Shedlovska 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.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	18
ВСТУП	20
РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ, ДЕШИФРУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ БАГАТОВИМІРНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ	29
1.1 Принцип формування сканерних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості	29
1.1.1 Системи дистанційного зондування Землі	29
1.1.2 Основні характеристики ДДЗ.....	33
1.1.3 Орбіти руху штучних супутників Землі	36
1.2 Методи попередньої обробки та підвищення інформативності даних ДЗЗ	38
1.2.1 Попередня обробка ДДЗ	38
1.2.2 Методи геометричної корекції зображень.....	39
1.2.3 Методи радіометричної та атмосферної корекції ДДЗ.....	43
1.2.4 Методи підвищення просторової розрізненості ДДЗ	44
1.3 Методи дешифрування та аналізу багатовимірних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості	47
1.3.1 Класифікація зображень методами контрольованої класифікації.....	48
1.3.2 Класифікація зображень методами неконтрольованої класифікації.....	50
1.3.3 Дешифрування ДДЗ методами машинного навчання	51
1.3.4 Сучасний стан досліджень з дешифрування аерокосмічних сканерних зображень	52
1.4 Характеристики зображень, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3	53

	15
1.5 Постановка проблеми	58
1.6 Висновки до розділу	59
РОЗДІЛ 2 ДЕШИФРУВАННЯ ДДЗ НА ОСНОВІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ	60
2.1 Тематична класифікація та ідентифікація об'єктів на багатовимірних зображеннях високої просторової розрізненості	60
2.2 Об'єктно-орієнтований підхід до аналізу та дешифрування багатовимірних зображень високої просторової розрізненості	61
2.3 Запропонована технологія дешифрування супутникових знімків високої просторової розрізненості	63
2.4 Методи сегментації зображень	65
2.4.1 Сегментація методом зсуву середнього	66
2.4.2 Метод багатомасштабної сегментації	69
2.4.3 Сегментація зображення на основі методу кластеризації K-середніх.....	72
2.5 Розрахунок властивостей сегментів	76
2.5.1 Геометричні властивості об'єктів.....	76
2.5.2 Просторові властивості об'єктів	78
2.5.3 Спектральні властивості об'єктів	78
2.5.4 Статистичні властивості об'єктів	80
2.5.5 Текстульні властивості об'єктів	81
2.6 Класифікація	82
2.7 Оцінка результатів класифікації.....	91
2.8 Висновки до розділу	97
РОЗДІЛ 3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ ТІНЕЙ НА СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ	99
3.1 Технологія ідентифікації та компенсації тіней	99
3.2 Властивості тіні	100
3.3 Ідентифікація тіні	102
3.3.1 Методи ідентифікації тіні.....	102

	16
3.3.2 Автоматична бінаризація зображення для отримання маски тіней	111
3.3.3 Порівняння точності методів ідентифікації тіні	115
3.4 Метод компенсації тіні	118
3.5 Обробка границь тіньових ділянок зображення	122
3.6 Дослідження властивостей тіней у кольоровому просторі HSV.....	124
3.7 Метод компенсації тіні з урахуванням параметрів для різних тіньових ділянок	127
3.8 Оцінка результатів роботи методу	128
3.9 Висновки до розділу	133
РОЗДІЛ 4 ГЕОМЕТРИЧНА КОРЕКЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ПОЗДОВЖНІМИ ПЗЗ-СКАНЕРАМИ	
135	
4.1 Формування фотограмметричних зображень поздовжніми ПЗЗсканерами	135
4.2 Геометричні викривлення, що виникають при формуванні зображень	136
4.2.1 Викривлення, спричинені конструкцією скануючої системи	137
4.2.2 Викривлення, спричинені нестабільністю положення та зміною швидкості платформи скануючої системи	139
4.2.3 Викривлення, пов'язані з формою та обертанням Землі.....	141
4.3 Методи геометричної корекції викривлень, спричинених нестабільністю положення платформи аерокосмічного апарату у просторі	142
4.4 Геометричних корекція сканерних зображень високої просторової розрізненості	145
4.4.1 Вхідні данні та вибір наземних контрольних точок	145
4.4.2 Автоматична ідентифікація лінійних об'єктів	146
4.4.3 Трансформування зображення.....	147
4.5. Висновки до розділу	149
ВИСНОВКИ.....	151

	17
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	153
ДОДАТКИ.....	170
ДОДАТОК А_СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	170
ДОДАТОК Б176_ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ	176
ДОДАТОК В178_ФРАГМЕНТИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ	178

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ДДЗ – дані дистанційного зондування;
ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;
НКТ – наземні контрольні точки;
ПЗЗ – пристрій з зарядовим зв'язком;
СКВ – середнє квадратичне відхилення;
СКП – середньоквадратична похибка;
ШСЗ – штучний супутник Землі;
ANN – artificial neural network;
DN – digital number;
ERGAS – relative dimensionless global error in synthesis;
FOV – field of view;
GFOV – geometric field of view;
GSI – ground sample distance;
HIS – hue saturation intensity;
HPF – high-pass filter;
HSV – hue saturation value;
IFOV – instantaneous field of view;
IOU – intersection over union;
LIDAR – light detection and ranging active sensor;
LPF – low-pass filter;
NDVI – normalized difference vegetation index;
NDWI – normalized difference water index;
NIR – near infrared;
NSVDI – normalized saturation-intensity difference index;
PCA – principal component analysis;
POS – positioning and orientation system;
PSNR – peak signal to noise ratio;
RASE – relative average spectral error;

RGB – red green blue;

RMSE – root mean square error;

RPC – rational function coefficients;

YCbCr – luma blue-difference component red-difference component;

YIQ – luma in-phase quadrature.

ВСТУП

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. Цяя 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 напрямкам, які виконуються в Дніпровському національному університеті імені Олеся Гончара з моделювання процесів формоутворення, ідентифікації та аналізу зображень проєкційної 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).

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.

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.

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.

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 обґрунтовано 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.

Практична цінність одержаних результатів

Практичне значення дисертації підтверджується впровадженнями результатів роботи у практику робіт ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРІІНА» (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 тіньових ділянок з можливістю їх контролю та пов'язаною з цим оптимізацією обсягів обчислювальних ресурсів;
- економії матеріальних і трудових ресурсів при експлуатації розроблених програмних модулів.

Достовірність та обґрунтованість результатів дисертації

Наукові положення та висновки, сформульовані у дисертаційній роботі Шедловської Я. І., всебічно проаналізовані та достатньо обґрунтовані. Дослідження, проведені у роботі, базуються на останніх досягненнях у галузі геометричного моделювання та багатовимірної геометрії з використанням сучасних уявлень про фізичні механізми формування сканерних зображень високого просторового розрізнення. Основні теоретичні положення дисертації одержано на основі апробованих методів попередньої обробки, методів дешифрування та аналізу багатовимірних супутникових зображень. Достовірність, точність та коректність отриманих результатів підтверджено відомими методами оцінки результатів обробки зображень; комп'ютерною реалізацією розроблених методів у вигляді прикладних алгоритмів дешифрування та попередньої обробки багатоспектральних цифрових зображень, які у сукупності утворюють цілісний програмний комплекс; впровадженнями результатів роботи.

Отримані наукові результати є достовірними, забезпечуються коректним використанням математичного апарату та новими методами обробки геопросторових даних, а також шляхом валідації отриманих результатів на незалежних тестових даних. Матеріали дисертації неодноразово обговорювалися на міжнародних конференціях.

Впровадження одержаних результатів

Результати досліджень, виконаних у кандидатській дисертації, впроваджено:

- у ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» (м. Дніпро) при обробці фотограмметричних багатоспектральних зображень високого просторового розрізнення, зокрема одержаних з космічних апаратів «Worldview»;
- у «Дніпрокосмос» філії Національного центру управління та випробувань космічних засобів ДКАУ при розробці методик і технологій автоматизованого оброблення інформації дистанційного зондування Землі для вирішення тематичних задач.

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 тіні на багатоспектральних 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 для класифікації [5]; ідентифікація будинків на супутникових знімках на основі об'єктно-орієнтованого підходу [6]; покращення методу компенсації тіней на супутникових знімках шляхом додавання процедури обробки границі тінювих ділянок [7]; розробка методу ідентифікації тіні та компенсації тіней на супутникових знімках високої просторової розрізненості [8]; розробка методу ідентифікації тіні з використанням автоматичного пошуку оптимального порогу бінаризації [9]; автоматизація методу компенсації тіні на супутникових знімках [10]; дослідження властивостей супутникових знімків, що можуть бути використані для аналізу та класифікації присутніх на них об'єктів [11]; розробка інформаційної технології підвищення просторової роздільної здатності багатоканальних фотограмметричних зображень [12]; метод пошуку схожих ділянок

супутникових знімків на основі розробленого методу класифікації [13]; розробка автоматичного методу ідентифікації об'єктів на супутникових знімках високої просторової розрізненості [14]; автоматизація методу ідентифікації будівель на багатоканальних фотограмметричних зображеннях [15]; автоматичний метод ідентифікації та підрахунку дерев на супутникових знімках [16]; розробка методу класифікації супутникового знімка на основі систем нечіткого логічного виведення [17]; розробка технології дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової роздільної здатності [18]; вдосконалення методу компенсації тіні завдяки аналізу властивостей тіньових ділянок супутникових знімків [19].

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 2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics (10–14.10. 2016. Kharkiv, Ukraine); на конференції 2016 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 2017 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 роботи. 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.

РОЗДІЛ 1 ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ФОРМУВАННЯ, ДЕШИФРУВАННЯ ТА АНАЛІЗУ БАГАТОВИМІРНИХ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

1.1 Принцип формування сканерних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості

1.1.1 Системи дистанційного зондування Землі

Дані дистанційного зондування, отримані за допомогою штучних супутників Землі (ШСЗ), містять корисну інформацію про об'єкти земної поверхні. Ця інформація застосовується у різних галузях людської діяльності [20, 21]. Космічні знімки надзвичайно корисні у картографуванні [22], сільському господарстві, контролі природних ресурсів, військовій розвідці та інших галузях [23, 24]. Оптичні системи, що встановлені на ШСЗ, охоплюють величезні площі земної поверхні, забезпечують періодичну та регулярну зйомку, що дозволяє спостереження за зміною навколишнього середовища та впливом на нього людської діяльності [25, 26].

В залежності від способів отримання інформації та типу систем ДЗЗ, геопросторові дані мають різні характеристики. За способом отримання даних системи дистанційного зондування діляться на пасивні і активні [27]. До пасивних систем відносяться скануючі оптико-електронні системи, що реєструють природне випромінювання. Активні системи (радіолокаційні та лазерні) самі посилають на Землю випромінювання, а потім фіксують його відображення. До активних систем дистанційного зондування Землі відносяться радіолокаційні системи, лазерні системи та системи LIDAR (Light Detection And Ranging active sensor). Вони дозволяють отримати інформацію про земну поверхню чи про атмосферу. Зокрема, по розсіюванню та поглинанню атмосферою лазерного випромінювання можна визначити її молекулярний склад. Система LIDAR призначена для вимірювання відстані

до об'єкту, посилаючи до нього імпульсне світлове випромінювання та вимірюючи відображений сигнал за допомогою приймача з чутливими детекторами. Фіксується час між переданим та відображеним сигналами, час множиться на швидкість світла і таким чином отримується відстань до об'єкта.

Радіолокаційна зйомка Землі ведеться в декількох ділянках діапазону довжин хвиль (1 см – 1 м) або частот (40 ГГц – 300 МГц). Характер зображення місцевості на радіолокаційному знімку залежить від співвідношення між довжиною хвилі і розмірами нерівностей місцевості: поверхня може бути різною, нерівною або гладкою, що проявляється в інтенсивності зворотного сигналу і, відповідно, яскравості відповідної ділянки на знімку [28, 29].

Останнім часом все більшого поширення набуває радіолокаційна інтерферометрія – метод обробки даних радіолокації, заснований на виділенні різниці фаз сигналів, відбитих різними ділянками місцевості. Він дозволяє обчислити шлях, пройдений радіохвилями до поверхні Землі і, відповідно, отримати високоточну інформацію як про абсолютні висоти місцевості, так і про зсуви поверхні, обумовлені різними факторами [30].

Основні спектральні діапазони, що використовуються при дистанційному зондуванні, наведено у табл. 1.1. Ці діапазони характеризуються тим, що на них приходяться вікна прозорості атмосфери, через які проходить випромінювання з певною довжиною хвиль. За межами цих діапазонів випромінювання поглинається різними складовими атмосфери.

Для отримання супутникових знімків використовуються мультиспектральні оптико-механічні системи – сканери. За допомогою сканерів формуються зображення, що складаються з окремих, послідовно одержуваних елементів. Термін "сканування" позначає розгортку зображення за допомогою скануючого елемента, що переглядає місцевість поперек руху носія і посилає потік променів у об'єктив, а далі на детекторний елемент, що

перетворює світловий сигнал в електричний. Сканерне зображення можна отримати в усіх спектральних діапазонах, але особливо ефективними є видимий і ІЧ-діапазони. При зйомці земної поверхні за допомогою скануючих систем формується зображення, кожному елементу якого відповідає яскравість випромінювання ділянки, що знаходиться в межах миттєвого поля зору IFOV (instantaneous field of view) [31].

Таблиця 1.1 – Основні спектральні діапазони зйомки систем ДЗЗ

Назва	Діапазон довжин хвиль	Джерело випромінення	Параметр поверхні що аналізується
Видимий (V)	0.4 – 0.7 мкм	Сонце	Відбивна здатність
Ближній інфрачервоний(NIR)	0.7 – 1.1 мкм	Сонце	Відбивна здатність
Короткохвильовий інфрачервоний(SWIR)	1.1 – 1.35 мкм 1.4 – 1.8 мкм 2.0 – 2.5 мкм	Сонце	Відбивна здатність
Середньохвильовий інфрачервоний(MWNIR)	3 – 4 мкм 4.5 – 5 мкм	Сонце, джерела тепла	Відбивна здатність, температура
Тепловий (довгохвильовий) інфрачервоний(TIR або LWIR)	8 – 9.5 мкм 10 – 14 мкм	Джерела тепла	Температура
Мікрохвильовий канал, радар	Від 1 мм до 1м	Тепловий (пасивна система) Штучний (активна система)	Температура (пасивна система) Рельєф (активна система)

Більшість оптичних систем ДЗЗ дозволяють одночасно отримувати мультиспектральні знімки у декількох діапазонах спектру. Такі знімки містять набагато більше корисної інформації, ніж в однозональних знімках, отриманих в одному спектральному діапазоні спектру, та панхроматичних знімках, що отримані у широкому діапазоні довжин хвиль [32].

Сканерні системи можуть бути різних типів. У лінійних сканерах для зйомки використовується один детекторний елемент. У поздовжніх ПЗЗ-сканерах використовується лінійка детекторних елементів, яка розташована перпендикулярно маршруту зйомки (рис. 1.1, б). Поперечні ПЗЗ-сканери мають один детекторний елемент, чи лінійку детекторних елементів, що рухається перпендикулярно маршруту зйомки, завдяки поворотному дзеркалу (рис. 1.1, а). Для усіх типів сканерних систем *кутом зору* FOV (field of view) зветься кут, що охоплює простір поперек маршруту зйомки, а відповідна відстань на земній поверхні – *ширина полоси зйомки* GFOV (geometric field of view) [33].

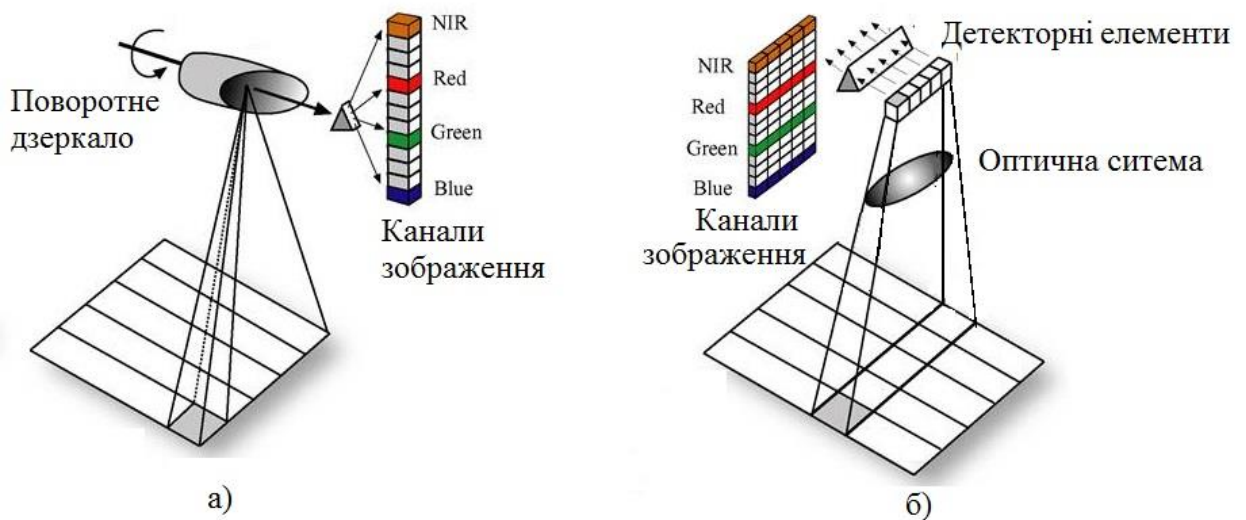


Рисунок 1.1 (а) – поперечний ПЗЗ-сканер; (б) – поздовжній ПЗЗ-сканер

ДДЗ, отримані оптичними сканерними системами, зберігаються у вигляді багатовимірних цифрових зображень. Багатовимірні цифрові зображення складаються з матриць пікселів, розміром I на J , де $i=1, \dots, I$ та $j=1, \dots, J$, відповідно рядки та стовбці зображення (рис. 1.2). Кожна з таких матриць зображення відповідає окремому спектральному каналу. Піксель у позиції (i, j) може бути представлений значеннями випромінювання в усіх спектральних каналах зображення як вектор \mathbf{x}_{ij} . Компоненти вектора відображують значення сірого у кожному каналі зображення (0, 1, ..., 255 для 8-бітних даних або 0, 1, ..., 2048 для 11-бітних даних). Значення, що

дорівнюють 0, зазвичай відповідають мінімуму віддзеркалення, та максимуму поглинання випромінювання поверхнею. Максимальні значення компонент вектора (255 чи 2048) відповідають найбільшому віддзеркалюванню та відсутності поглинання випромінювання. Значення пікселів знімка фіксуються під час руху платформи скануючої системи вздовж маршруту зйомки. Неперервний сигнал, що надходить на датчики, перетворюється у дискретні значення пікселів.

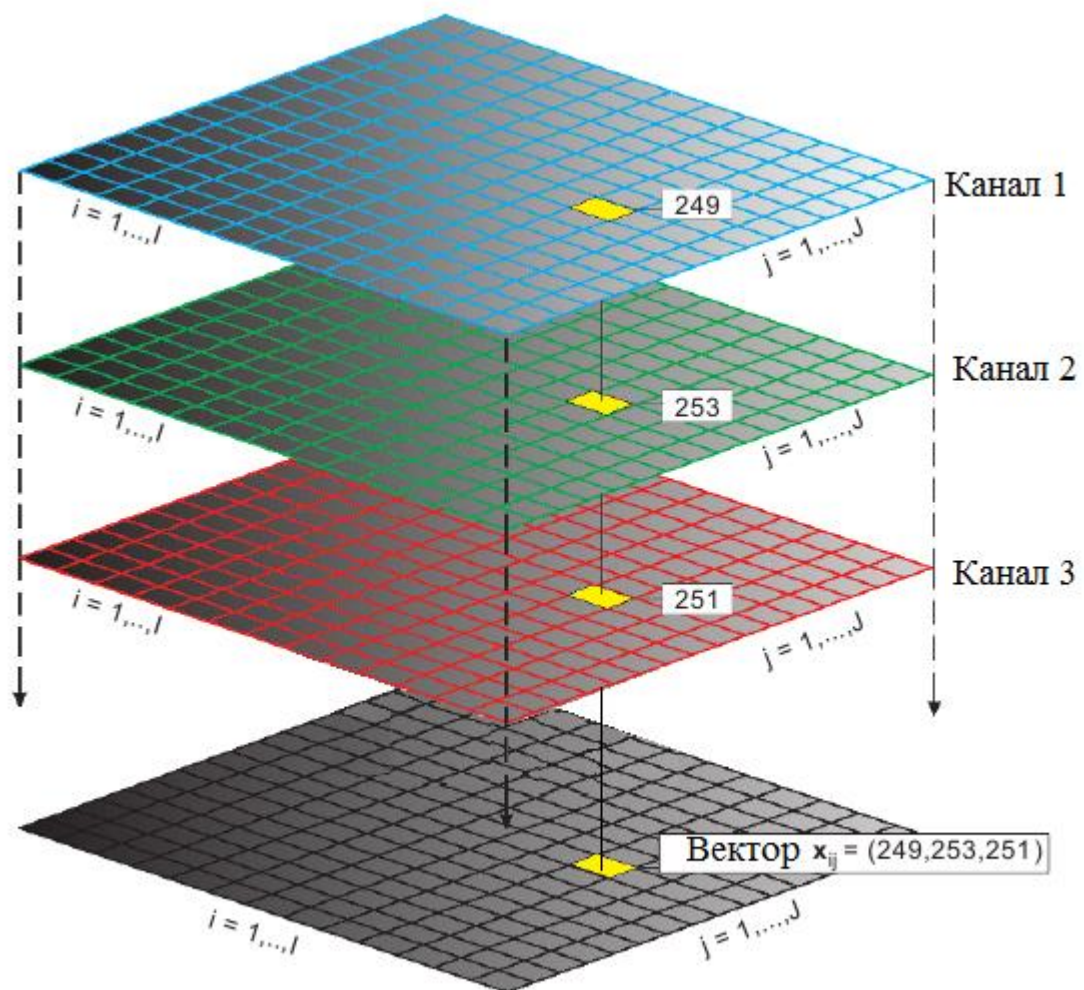


Рисунок 1.2 – Структура багатовимірного цифрового зображення

1.1.2 Основні характеристики ДДЗ

Найголовнішими характеристиками супутникових знімків є *спектральна, просторова та радіометрична розрізненість*. Супутникові

знімки отримані, різними сканерними системами, відрізняються за їх *просторовою розрізненістю*. Просторова розрізненість визначається *миттєвим полем зору IFOV* (instantaneous field of view). Сканер супутника складається з детекторних елементів, кожен з яких фіксує конкретну площу, яка представляється одним пікселем зображення. IFOV – це ширина проєкції одного детекторного елемента на земну поверхню [34].

Просторова розрізненість супутникового знімка залежить від того, яку площу земної поверхні охоплює окремий піксель. Відстань між центрами сусідніх пікселів зветься *наземним інтервалом дискретизації (GSI)* [35].

$$\text{GSI} = d \cdot \frac{H}{f} = \frac{d}{m}, \quad (1.1)$$

де m – коефіцієнт геометричного збільшення, а величина міждетекторного інтервалу d зазвичай дорівнює ширині детекторного елемента w .

GSI визначається висотою платформи H , фокусною відстанню f та міждетекторним інтервалом.

Наземний інтервал дискретизації і миттєве поле огляду знаходяться діленням відстані між детекторами i , відповідно, ширини детектора на величину геометричного збільшення m

$$\text{GIFOV} = 2 \cdot H \cdot \text{tg}\left(\frac{\text{IFOV}}{2}\right) = w \cdot \frac{H}{f} = \frac{w}{m}. \quad (1.2)$$

Під час аналізу даних ДЗЗ надається перевага використанню миттєвого поля огляду GIFOV, а не миттєвого кута огляду IFOV. В той же час розробники систем дистанційного зондування використовують, головним чином, кутові параметри FOV та IFOV тому, що ці величини мають однакові значення в просторі зображення і в просторі об'єктів (рис. 1.3).

$$\text{IFOV} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{w}{2f}\right) \approx \frac{w}{f}. \quad (1.3)$$

Спектральною розрізненістю систем дистанційного зондування є діапазони довжин хвиль, які здатен зафіксувати сенсор на супутнику. Сучасні системи дистанційного зондування мають різну спектральну розрізненість,

тому вони здатні отримувати різні типи даних. У таблиці 1.2 наведені спектральні діапазони фіксації даних для різних сучасних супутників.

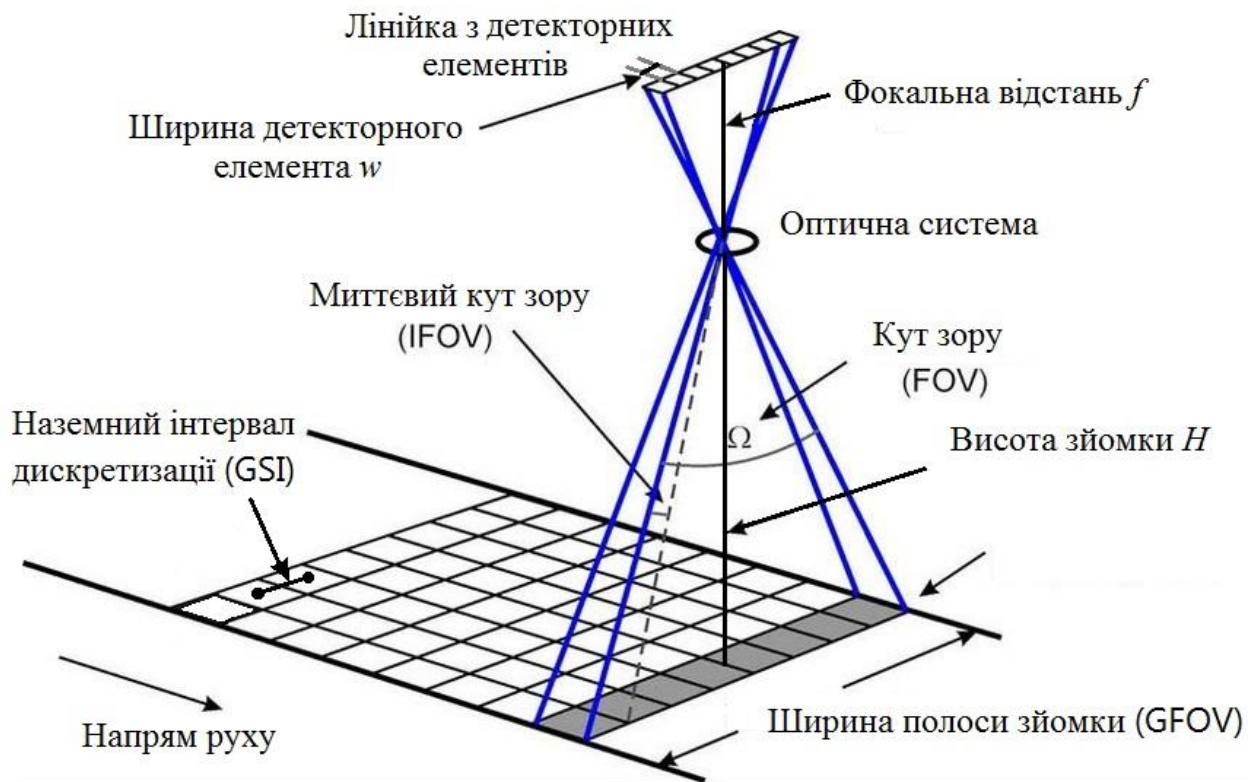


Рисунок 1.3 – Геометрична ілюстрація просторових особливостей сканування

У таблиці 1.2 наведено просторову розрізненість деяких супутників у метрах на піксель. Чим вища просторова розрізненість, тим менші об'єкти можуть бути ідентифіковані на знімках.

Радіометрична розрізненість характеризується найменшим видимим електромагнітним випромінюванням. Значення кожного пікселя знімка визначається енергією, що надходить на детекторний елемент сканера. Отримане випромінювання перетворюється апаратурою на електричний сигнал, а потім у дискретне значення пікселя. Значення пікселів DN (digital number) зберігають у двійковому коді, тому значення пікселя залежить від кількості біт пам'яті Q , відведених для запису одного пікселя.

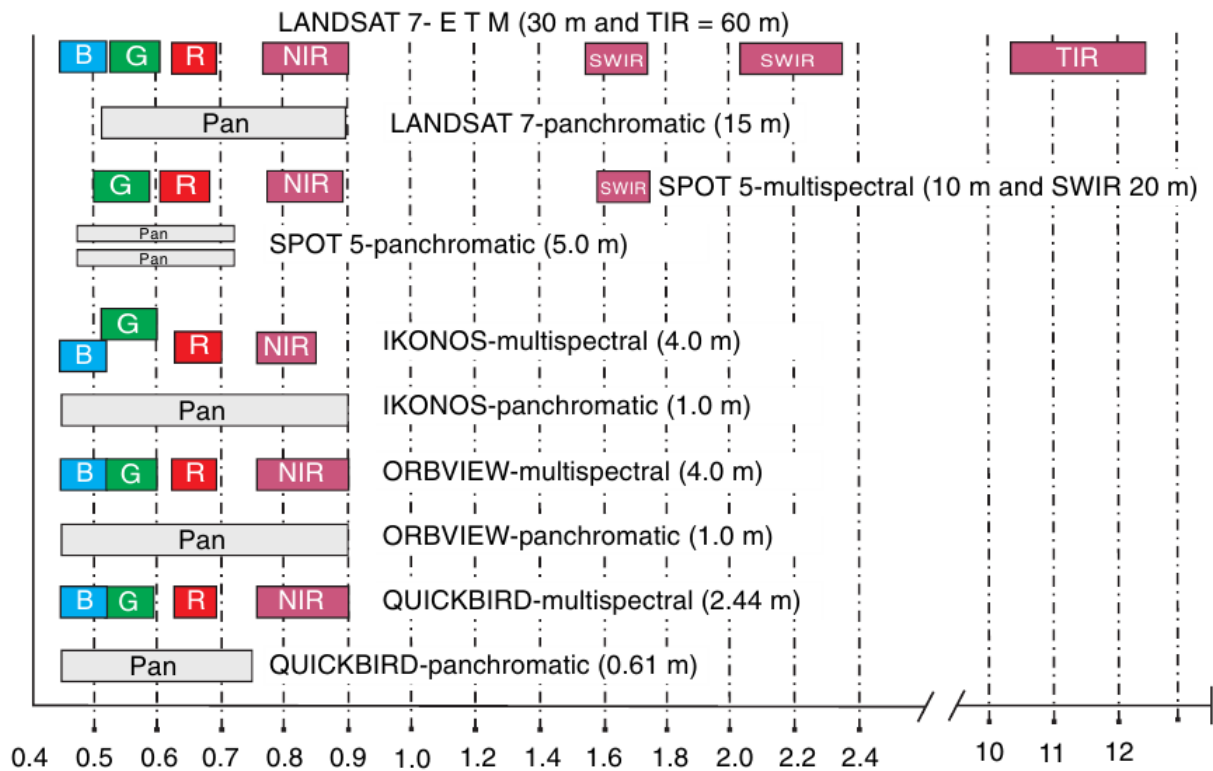
$$N_{DN} = 2^Q. \quad (1.4)$$

При цьому значення пікселя може бути будь яким цілим числом в діапазоні:

$$DN_{\text{ДИАПАЗОН}} = [0; 2^Q - 1]. \quad (1.5)$$

Чим більша величина Q , тим точніше дискретні дані апроксимують вихідний безперервний сигнал і тим вища радіометрична розрізненість детектора.

Таблиця 1.2 – Порівняння спектральної та просторової розрізненості існуючих систем дистанційного зондування



1.1.3 Орбіти руху штучних супутників Землі

Орбіти ШСЗ можуть бути *круговими* та *еліптичними*. Кругові орбіти дозволяють вести зйомку з постійної висоти, що значно спрощує геометричну корекцію знімків. Висота орбіти супутника значно впливає на результати ДЗЗ. Від неї залежать такі характеристики зображення, як полоса огляду і просторова роздільна здатність. Чим вище супутник над поверхнею Землі, тим ширша полоса огляду і тим нижча просторова роздільна здатність.

Кут i між площиною орбіти ШСЗ і площиною екватора називається нахилом орбіти ($0^\circ \leq i \leq 180^\circ$) (рис. 1.4). Нахил орбіти визначає граничні широти, тобто області, що доступні для спостереження з відповідного супутника.

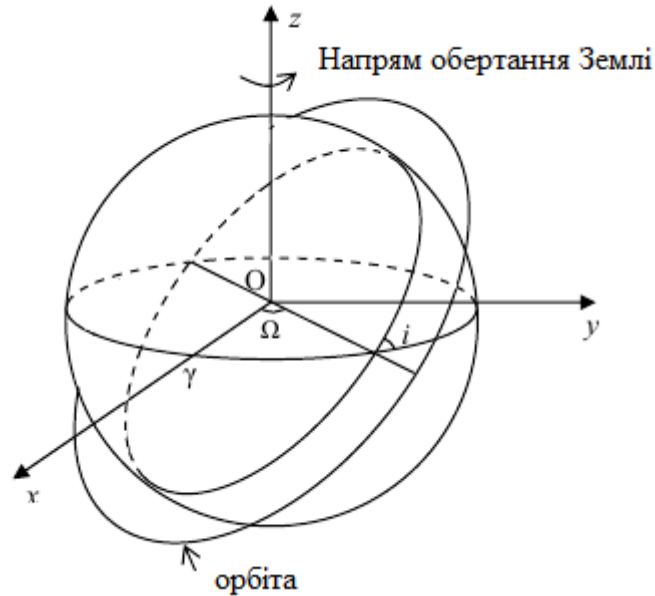


Рисунок 1.4 – Орбіта руху супутника в абсолютній геоцентричній системі координат

Чим ближче кут i до 90° , тим більша частина земної кулі доступна для спостереження. Максимальний огляд забезпечують так звані *приполярні* орбіти, що проходять через полюси або близько до них.

Періодичність покриття супутником певної території залежить від періоду обертання T космічного апарату навколо Землі – термін часу, за який супутник робить повний оборот, а також зміщення траєкторії по довготі за період обертання розраховується по формулі:

$$\Delta\lambda = -Tc, \quad (1.6)$$

де c – кутова швидкість Землі, дорівнює $7,292 \times 10^5 \text{ c}^{-1}$.

Зміщення траєкторії за довготою – величина постійна для кожного витка. Таким чином, знаючи координати проєкції траєкторії на земну поверхню для одного витка, можна досить просто продовжити її для наступних витків шляхом послідовного зміщення всіх точок на величину, кратну $\Delta\lambda$.

Для супутників, що знаходяться на круговій орбіті на висоті 35800 км, період обертання буде дорівнювати 24 годинам. Якщо при цьому $i=0^\circ$, то супутник, обертаючись в східному напрямку, буде весь час знаходитися над однією точкою поверхні Землі на екваторі. Такі орбіти зветься *геостаціонарними*, вони зазвичай використовуються для метеорологічних супутників та для супутників зв'язку [36].

Часто при вирішенні прикладних задач потрібно порівнювати дані, отримані в ході багаторічних спостережень одних і тих самих районів. В таких випадках використовують *сонячно-синхронні* орбіти. Вони забезпечують виконання однакових умов освітлення при проведенні зйомки. Рух супутника по такій орбіті синхронізується з обертанням Землі навколо своєї осі, а прецесія – з обертанням Землі навколо Сонця. В результаті кут між площиною орбіти і напрямом на Сонце залишається приблизно постійним. Супутник перетинає площину екватора у східному вузлі завжди в один і той же місцевий час.

1.2 Методи попередньої обробки та підвищення інформативності даних ДДЗ

1.2.1 Попередня обробка ДДЗ

Обробка ДДЗ, що зберігаються у цифровому форматі, виконується за допомогою комп'ютерних програм та алгоритмів обробки цифрових зображень. Обробку ДДЗ можна поділити на два важливих етапи: попередня обробка та тематична обробка. У ході попередньої обробки з даних усуваються радіометричні та геометричні спотворення. Покращення якості зображення дозволяє зробити його більш зручним для аналізу та обробки автоматичними методами. На етапі тематичної обробки відбувається вилучення та аналіз інформації, яка затребувана користувачем.

Розрізняють такі види попередньої обробки:

- геометрична корекція супутникових знімків;
- радіометричне калібрування знімків;
- корекція впливу атмосфери;
- відновлення пропущених пікселів;
- усунення шумів на зображеннях;
- підвищення просторової роздільної здатності.

До методів попередньої обробки можна також віднести компенсацію тіней. Для деяких задач присутність тіней на знімку небажана. Технологія компенсації тіней складається з декількох етапів. Один з етапів – ідентифікація тіней [37]. У роботі було досліджено існуючі методи ідентифікації тіней, щоб з'ясувати, який з методів дає найкращий результат для оброблюваних знімків.

На етапі попередньої обробки часто застосовуються такі методи, як метод головних компонент (РСА), вейвлет перетворення, перетворення Фур'є, морфологічні операції. Ці методи дозволяють виділити та підкреслити властивості зображення, які будуть надалі використані для інтерпретації та дешифрування.

1.2.2 Методи геометричної корекції зображень

В більшості випадків на знімках, отриманих системами ДЗЗ, присутні геометричні викривлення [38]. Ці викривлення виникають через відхилення оптичної осі камери від вертикального положення в момент зйомки, кривизну земної поверхні, нерівності рельєфу, обертання Землі, рух супутника, нахил орбіти, особливості конструкції сканерної системи, параметри датчика та ін. Внаслідок цього проведення точних вимірів по знімку неможливе. В залежності від типу сканерної системи, для відновлення геометрії зображень використовують різні методи і технології фотограмметричної обробки [39, 40, 41].

При геометричній корекції вирішуються такі задачі:

Суміщення двох знімків одної області, так щоб відповідні пікселі знімків відносилися до одної точки земної поверхні.

Геометричне трансформування зображення відносно карти, а також прив'язка даних до системи координат.

Геокодування зображення. Це геометричне трансформування, в наслідок якого усі пікселі зображення приводяться до стандартного значення GSI.

Ортотрансформування – попиксельна корекція зображення з метою усунення геометричних викривлень.

Для геометричного трансформування знімка найчастіше використовується поліноміальна модель, що зв'язує глобальні координати оброблюваного знімка (x, y) з координатами еталонного зображення (x_{ref}, y_{ref}) чи карти. a_{ij} та b_{ij} – коефіцієнти поліномів.

$$x = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} a_{ij} x_{ref}^i y_{ref}^j, \quad y = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^{N-i} b_{ij} x_{ref}^i y_{ref}^j. \quad (1.7)$$

У (1.7) величини x та y описані поліномами від двох змінних x_{ref} та y_{ref} .

Рівень деталізації такого наближеного метода залежить від ступеня поліному N .

Якщо з даних усунено значну частку системних апаратних викривлень, то для подальшої геометричної корекції застосовують поліноми першого порядку:

$$\begin{aligned} x &= a_{00} + a_{10}x_{ref} + a_{01}y_{ref} \\ y &= b_{00} + b_{10}x_{ref} + b_{01}y_{ref} \end{aligned} \quad (1.8)$$

Перетворення (1.8) зветься афінним перетворенням і враховує такі деформації, як зсув, розтягнення, поворот. Формулу (1.8) можна подати у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{10} & a_{01} \\ b_{10} & b_{01} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_{ref} \\ y_{ref} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{00} \\ b_{00} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

чи

$$\mathbf{p} = \mathbf{T}\mathbf{p}_{ref} + \mathbf{T}_0. \quad (1.10)$$

Це перетворення використовується для наближеної корекції викривлень, спричинених властивостями сканерних систем. Для того щоб визначити коефіцієнти поліноміальної моделі (1.8), необхідно задати набір наземних контрольних точок (НКТ), які повинні відповідати наступним вимогам:

- високий контраст на усіх робочих знімках;
- невеликий розмір;
- постійне місцезнаходження;
- однакова висота.

Експериментально визначено, що кількість пар НКТ (M) та їх розташування мають вплив на якість корекції. НКТ повинні бути рівномірно розподілені на зображенні. Мінімальна кількість НКТ залежить від моделі сенсора та порядку поліноміальної моделі N :

$$\min M = \frac{(N + 1) \cdot (N + 2)}{2}. \quad (1.11)$$

Якщо задано M пар контрольних точок у системах координат оброблюваного та еталонного зображення, у глобальній поліноміальній моделі викривлень для кожної пари контрольних точок (КТ) m можна записати многочлен N ступеня відносно змінних x та y . Якщо $N=2$:

$$\begin{aligned} x_m &= a_{00} + a_{10}x_{refm} + a_{01}y_{refm} + a_{11}x_{refm}y_{refm} + a_{20}x_{refm}^2 + a_{02}y_{refm}^2 \\ y_m &= b_{00} + b_{10}x_{refm} + b_{01}y_{refm} + b_{11}x_{refm}y_{refm} + b_{20}x_{refm}^2 + b_{02}y_{refm}^2, \end{aligned} \quad (1.12)$$

що дає M пар рівнянь відносно невідомих коефіцієнтів. Цю систему рівнянь можливо представити у векторно-матричній формі:

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{ref1} & y_{ref1} & x_{ref1}y_{ref1} & x_{ref1}^2 & y_{ref1}^2 \\ 1 & x_{ref2} & y_{ref2} & x_{ref2}y_{ref2} & x_{ref2}^2 & y_{ref2}^2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{refM} & y_{refM} & x_{refM}y_{refM} & x_{refM}^2 & y_{refM}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{00} \\ a_{10} \\ a_{01} \\ a_{11} \\ a_{20} \\ a_{02} \end{bmatrix}, \quad (1.13)$$

або

$$\mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{A}, \quad (1.14)$$

аналогічно для координат y :

$$\mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{B}. \quad (1.15)$$

Якщо M дорівнює кількості поліноміальних коефіцієнтів K , то рівняння (1.14) та (1.15) мають точні рішення, які знаходяться за допомогою оберненої матриці \mathbf{W}^{-1} розміром M на M :

$$M = K : \begin{cases} \mathbf{A} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{X} \\ \mathbf{B} = \mathbf{W}^{-1}\mathbf{Y} \end{cases}, \quad (1.16)$$

Помилка поліноміальної апроксимації у кожній КТ дорівнює нулю. Оскільки, позиція КТ може бути визначена не точно, бажано, щоб їх кількість перевищувала кількість невідомих коефіцієнтів полінома.

$$M \geq K : \begin{cases} \mathbf{X} = \mathbf{W}\mathbf{A} + \varepsilon_x \\ \mathbf{Y} = \mathbf{W}\mathbf{B} + \varepsilon_y \end{cases}, \quad (1.17)$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – вектори похибок визначення положення НКТ.

Якщо M більше K , для матриці W розміром M на K вже не можливо знайти обернену матрицю, але можливо знайти псевдо-зворотне рішення:

$$M \geq K : \begin{cases} \hat{\mathbf{A}} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{X} \\ \hat{\mathbf{B}} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \mathbf{Y} \end{cases}, \quad (1.18)$$

яке еквівалентне рішення, отриманому методом найменших квадратів з мінімізацією загальної квадратичної похибки поліноміальної апроксимації по наземним контрольним точкам:

$$M \geq K : \begin{cases} \min[\varepsilon_x^T \varepsilon_x] = (\mathbf{X} - \mathbf{W}\hat{\mathbf{A}})^T (\mathbf{X} - \mathbf{W}\hat{\mathbf{A}}) \\ \min[\varepsilon_y^T \varepsilon_y] = (\mathbf{Y} - \mathbf{W}\hat{\mathbf{B}})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{W}\hat{\mathbf{B}}) \end{cases}. \quad (1.19)$$

Ортотрансформування ДДЗ. Найбільш точний підхід до фотограмметричної обробки супутникових зображень – це моделювання процесу зйомки, у результаті чого відновлюється просторове положення сукупності промінів, що формують знімок. Для цього повинні бути відомими: траєкторія супутника лінійні елементи зовнішнього орієнтування,

орієнтація сенсора, елементи внутрішнього орієнтування (модель сенсора). У комплект ДДЗ, отриманих певними типами супутників, входять значення коефіцієнтів RPC (rational function coefficients). Ці значення визначаються по відомим геометричним моделям сенсорів та результатам бортових траєкторних вимірювань.

У методі *раціональних функцій* використовуються відношення типу:

$$X_N = \frac{P_1(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{P_2(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}, \quad Y_N = \frac{P_3(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}{P_4(\varphi_N, \lambda_N, h_N)}, \quad (1.20)$$

де у знаменниках та чисельниках стоять поліноми третього ступеня, що зв'язують координати $\varphi_N, \lambda_N, h_N$ точки місцевості з координатами x_N, y_N її зображення на знімку.

$$P_q(\varphi_N, \lambda_N, h_N) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_{ijkq} \cdot \varphi_N^i \cdot \lambda_N^j \cdot h_N^k, \quad (1.21)$$

$$i + j + k \leq 3 \quad q = 1..4$$

Коефіцієнти, що входять до співвідношення (1.21), означають як RPC. Метод раціональних функцій є апроксимуючим методом, але він забезпечує практично ту саму точність, як при використанні точної моделі.

1.2.3 Методи радіометричної та атмосферної корекції ДДЗ

Перед тим як потрапити на детекторні елементи скануючої системи, випромінювання, що відбивається від земної поверхні, зазнає значного впливу атмосфери. В результаті на одержаних знімках, окрім випромінювання від об'єкту, присутній вплив атмосфери. Дешифрування об'єктів земної поверхні ускладнюється такими атмосферними ефектами, як згасання випромінювання, розсіювання випромінювання облаками та аерозолями. Методи атмосферної корекції поділяють на відносні та абсолютні. Абсолютні методи враховують фізичні параметри та стан атмосфери у момент зйомки. Відносні методи включають гістограмну

обробку знімків, базуючись на отриманих раніше знімках тієї ж самої місцевості.

Через радіометричні спотворення, що виникають внаслідок відмінностей в умовах освітленості та характеристиках датчика, випромінювання, що фіксується сканерною системою, можуть не відповідати випромінюванню з об'єктів, що представляють інтерес. Методи радіометричної корекції усувають шуми, що виникають внаслідок змін чутливості датчика, через несправності, викликані роботою на орбіті протягом тривалого періоду часу. Вимірний сигнал від несправного датчика містить радіометричні помилки, що виникають внаслідок зміни функції відповіді датчика. Щоб вирішити цю проблему, повинні бути встановлені нові залежності між каліброваним випромінювання і вихідним сигналом датчика. Цей процес також називається радіометричним калібруванням. Також методи радіометричної корекції допомагають усунути ефекти нерівномірної освітленості, спричинені кутом сонця і рельєфом.

1.2.4 Методи підвищення просторової розрізненості ДЗ

Як правило, панхроматичний канал супутникових знімків має вищу просторову розрізненість ніж мультиспектральні канали. Тому виникає потреба підвищення розрізненості мультиспектральних каналів шляхом синтезу каналів зображення, отриманих у різних спектральних діапазонах. Існують різні методи підвищення просторової розрізненості:

Модуляція інтенсивності. Головна ідея методу – це помноження панхроматичного зображення на мультиспектральне зображення низької просторової розрізненості, знаходження геометричного середнього та підбір експериментальним шляхом масштабуючих коефіцієнтів a_R , a_G , a_B та параметрів зсуву b_R , b_G , b_B . Для трансформації застосовуються такі перетворення значень інтенсивності пікселів мультиспектральних (R, G, B) і панхроматичного (P) каналів:

$$\begin{aligned}
 R' &= a_R + b_R \sqrt{P \cdot R} \\
 G' &= a_G + b_G \sqrt{P \cdot G} \\
 B' &= a_B + b_B \sqrt{P \cdot B}
 \end{aligned}
 \tag{1.22}$$

Метод “Brovey”. Основна ідея методу “Brovey” полягає в тому, що спочатку кожен діапазон мультиспектрального зображення низької розрізненості множать на діапазон панхроматичного зображення з високою розрізненістю, а потім кожний отриманий добуток ділиться на суму діапазонів мультиспектрального знімка. Для трансформування застосовують наступні співвідношення:

$$\begin{aligned}
 R' &= \frac{R}{(R + G + B)} \cdot P \\
 G' &= \frac{G}{(R + G + B)} \cdot P \\
 B' &= \frac{B}{(R + G + B)} \cdot P
 \end{aligned}
 \tag{1.23}$$

Метод “Brovey” був розроблений для підвищення візуального контрасту в нижніх і верхніх частинах гістограми (тобто дозволяє забезпечити контраст в тіні, водних поверхнях і в областях з високою відбивною здатністю). Тому цей метод не придатний для збереження високих радіометричних характеристик вхідного зображення.

Злиття зображень на основі фільтрації. При використанні цього методу підвищення роздільної здатності здійснюється за рахунок перенесення високочастотних складових панхроматичного зображення на мультиспектральне зображення. Перетворення здійснюється у відповідності з наступним алгоритмом:

$$\begin{aligned}
 R' &= FT^{-1} \cdot LPF \cdot FT(R) + HPF \cdot FT(P) \\
 G' &= FT^{-1} \cdot LPF \cdot FT(G) + HPF \cdot FT(P) \\
 B' &= FT^{-1} \cdot LPF \cdot FT(B) + HPF \cdot FT(P)
 \end{aligned}
 \tag{1.24}$$

де LPF (low-pass filter) – низькочастотна фільтрація, HPF (high-pass filter) – високочастотна фільтрація, FT – пряме двовимірне перетворення Фур'є, FT⁻¹ – зворотнє двовимірне перетворення Фур'є.

Перетворення Грамма–Шмидта. Метод розроблено для отримання ортогональних каналів з відомою кореляцією. Для трьох каналів R, G, B з відомою кореляцією:

$$\rho_{RG} = E[\mathbf{R}, \mathbf{G}], \quad \rho_{GB} = E[\mathbf{G}, \mathbf{B}], \quad \rho_{RB} = E[\mathbf{R}, \mathbf{B}]. \quad (1.25)$$

На першому кроці процедури отримують два вектори v_B^R, v_G^R ортогональні R, та корельовані між собою:

$$\begin{bmatrix} v_G^R \\ v_B^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -q_G^R & 1 & 0 \\ -q_B^R & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}, \quad (1.26)$$

де $q_j^R = p_{Rj} p_{RR}$, $j = G, B$. Другий шаг:

$$v_B^G = v_B^R - \frac{E[v_B^R \cdot v_G^R]}{E[v_G^R]^2} \cdot v_G^R. \quad (1.27)$$

У результаті отримують три ортогональні вектори R, v_B^G, v_G^R , один з яких заміщується даними каналу з високою просторовою розрізненістю R, та проводиться обернене перетворення.

Використання синтезованих зображень з підвищеною просторовою розрізненістю значно підвищує можливості аналізу та дешифрування даних [42]. Однак, ця процедура призводить до невірної передачі кольору. Для покращення якості злиття було розроблено безліч методів, кожен з яких призначений для певного типу даних. Проблема появи викривлень та невірної передачі кольору набула особливої актуальності з появою ДДЗ високої просторової розрізненості, зокрема даних отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3. Це обумовлено тим, що діапазон довжин хвиль панхроматичного каналу з означених супутників було розширено до ближньої інфрачервоної ділянки спектру. Це значно змінює значення рівнів

сірого таких панхроматичних зображень. Щоб уникнути цього, у роботі [12] було розроблено ефективний метод, що включає в себе вейвлет-декомпозицію, HSV-перетворення та гіперсферичну трансформацію.

1.3 Методи дешифрування та аналізу багатовимірних аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості

Дешифрування ДДЗ – це процес вилучення з даних корисної інформації про об'єкти на супутниковому знімку. Дешифрування охоплює низку задач обробки ДДЗ: класифікацію супутникових знімків, розпізнавання окремих об'єктів, пошук і підрахунок об'єктів одного типу, встановлення властивостей об'єктів, присутніх на знімку.

Задача класифікації зображення полягає у тому, що кожний піксель зображення x_{ij} , представлений вектором значень у N спектральних каналах, відноситься до одного з класів. Класичні алгоритми класифікації зображень, що застосовуються при обробці ДДЗ, можна поділити на алгоритми *контрольованої* та *неконтрольованої класифікації*. Також, алгоритми класифікації можна поділити на *параметричні* та *непараметричні*. Параметричні алгоритми ґрунтуються на статистичному розподілі ймовірностей (найчастіше нормальний розподіл) і потребують оцінок параметрів розподілу, таких як математичне очікування чи коваріаційна матриця. Непараметричні алгоритми не роблять припущень про розподіл ймовірностей і часто вважаються робастними. До непараметричних класифікаторів відносяться: алгоритм паралелепіпеда, алгоритм визначення мінімальної відстані, класифікатор найближчого сусіда, класифікатор штучної нейронної мережі (ANN) та інші. До параметричних класифікаторів відносять: класифікатор найближчого середнього, класифікатор максимальної вірогідності.

1.3.1 Класифікація зображень методами контрольованої класифікації

Для контрольованої класифікації використовують еталонні області, які обираються оператором у відповідності до їх належності до певного інформаційного класу. Для кожної еталонної області визначаються спектральні ознаки, які представляють один клас пікселів на знімку. Кожен піксель відноситься до одного з класів, послідовно порівнюючись з усіма еталонними ознаками. При контрольованій класифікації спочатку визначаються інформаційні класи та їх число, а потім відповідні їм спектральні класи.

Алгоритм класифікації на основі визначення найменшої відстані. Цей алгоритм є одним з найпростіших і найбільш часто застосованих. Вхідні дані – середні вектори, отримані на етапі навчання для кожного класу і кожного спектрального діапазону. Для кожного значення яскравості пікселя BV_{ijk} , що не відноситься до навчальної вибірки, обчислюється евклідова відстань D до середнього вектора μ_{ck} відповідно до формули:

$$D = \sqrt{(BV_{ijk} - \mu_{ck})^2 + (BV_{ijl} - \mu_{cl})^2}. \quad (1.28)$$

Піксель відноситься до класу, відстань до якого найменша.

Алгоритм паралеліпеду. Цей алгоритм класифікації базується на звичайній булевій логіці і статистичних показниках навчальної вибірки в n спектральних діапазонах. Спочатку для кожного класу c і діапазону k обчислюється середнє значення яскравості в навчальній вибірці μ_{ck} і σ_{ck} . Після цього для класифікації пікселів знімка застосовують наступне правило. Піксель належить класу тоді, і тільки тоді, коли його яскравість BV_{ijk} задовольняє наступній умові:

$$\mu_{ck} - \sigma_{ck} \leq BV_{ijk} \leq \mu_{ck} + \sigma_{ck}, \quad (1.29)$$

де $c=1,2,3,\dots,m$ означає клас, а $k=1,2,3,\dots,m$ – спектральний діапазон.

Якщо позначити нижню та верхню границі нерівності як:

$$L_{ck} = \mu_{ck} - \sigma_{ck}, \quad H_{ck} = \mu_{ck} + \sigma_{ck}, \quad (1.30)$$

то нерівність набуде вигляду:

$$L_{ck} \leq BV_{ijk} \leq H_{ck}. \quad (1.31)$$

Множина точок, що відповідає нерівності (1.31), утворює паралелепіпед у n -мірному просторі спектральних ознак. Якщо значення яскравості пікселів належать до паралелепіпеду, піксель відноситься до цього класу.

Класифікатори, основані на теоремі Байєса – широкий клас алгоритмів класифікації, заснований на принципі максимуму апостеріорної ймовірності. Для пікселя обчислюються функції вірогідності кожного з класів, по ним обчислюються апостеріорні ймовірності класів. Необхідно мати наступні вірогідності: апріорні вірогідності $p(i)$, розподіл навчальної вибірки $p(\mathbf{f}/i)$, апостеріорну вірогідність $p(i/\mathbf{f})$, яка знаходиться за формулою Байєса:

$$p(i/\mathbf{f}) = \frac{p(\mathbf{f}/i)p(i)}{p(\mathbf{f})}, \quad (1.32)$$

де \mathbf{f} – вектор ознак пікселя, i – число класів, $p(\mathbf{f})$ визначається за формулою:

$$p(\mathbf{f}) = \sum_i p(\mathbf{f}/i)p(i). \quad (1.33)$$

Правило прийняття рішень формулюється за допомогою апостеріорних ймовірностей з рівняння (1.32). Піксель належить до того класу, чия апостеріорна вірогідність більша, ніж для інших класів.

Алгоритм максимальної вірогідності. Даний метод дозволяє врахувати можливі варіації спектральних ознак і вирішити проблеми, що виникають через перетин класів. Останні часто виникають в тих випадках, коли потрібно класифікувати пікселі, близькі за своїми спектральним характеристикам.

У методі максимальної вірогідності піксель приписується до того класу, який максимізує функцію вірогідності класифікації. Дані з навчальної вибірки використовуються для обчислення середнього вектора вимірювань

M_c і коваріаційної матриці V_c для кожного класу c і спектрального діапазону k .

Критерій належності пікселя до певного класу формулюється наступним чином. Піксель x належить класу c в тому, і тільки в тому випадку, якщо

$$p_c > p_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1.34)$$

де m – кількість класів, вірогідність p_c визначається як

$$p_c = [-0,5 \log \{ \det(V_c) \}] - 0,5 \left[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c) \right], \quad (1.35)$$

а p_i позначає ймовірність того, що даний клас існує. Якщо немає апріорних відомостей про просторові об'єкти, вірогідність для всіх класів буде однаковою. Якщо ж відомо, що вірогідність існування одних класів більша, ніж інших, оператор може задати набір апріорних значень ймовірності для відповідних спектральних ознак. Критерій приналежності пікселя до певного класу, при цьому, буде формулюватися таким чином. Піксель x належить класу c в тому, і тільки в тому випадку, якщо

$$p_c(a_c) > p_i(a_c) \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (1.36)$$

$$p_c(a)_c = \log(a_c) - [-0,5 \log \{ \det(V_c) \}] - 0,5 \left[(X - M_c)^T (V_c)^{-1} (X - M_c) \right], \quad (1.37)$$

Використання апріорних ймовірностей дозволяє враховувати особливості рельєфу та інших характеристик території.

1.3.2 Класифікація зображень методами неконтрольованої класифікації

При неконтрольованій класифікації спочатку на основі інформації, що представлена в даних, виділяються спектральні класи, а лише потім вони порівнюються з відомим розподілом класів на місцевості. Групування даних відбувається за допомогою алгоритмів кластерного аналізу. У якості початкових даних алгоритму вказуються кількість кластерів, критерії

роздільності кластерів та можливий розкид значень у кластері. Процес розбиття на кластери є ітераційним.

Алгоритм *кластеризації К-середніх* відносить кожний піксель зображення до одного з заздалегідь визначених кластерів. К випадкових пікселів зображення обираються як початкові центри кластерів. Кожен піксель зображення відноситься до кластеру, відстань до якого найменша. Алгоритм мінімізує стандартне відхилення пікселів від центрів кластерів. На кожній ітерації розраховуються нові центри кластерів та пікселі зображення розподіляються на кластери по-новому. Процес повторюється поки кластери не залишаться незмінними.

Алгоритм ISODATA (Iterative self Organizing Data Analysis Technique) це модифікований алгоритм К-середніх. Він полягає у злитті кластерів в тому випадку, якщо їх роздільність нижче порогового значення, а також у розділенні кластеру, якщо він стає занадто великим.

1.3.3 Дешифрування ДДЗ методами машинного навчання

Нейронні мережі широко застосовуються при вирішенні задач класифікації [43]. У якості вхідних даних застосовують вектори значень пікселів у різних спектральних діапазонах зображення, у результаті роботи мережі піксель відноситься до одного з класів. Навчання мережі проходить на базі пікселів еталонних вибірок [44].

Класична нейронна мережа – це множина нейронів, з'єднаних між собою. Передаточні функції нейронів зазвичай фіксовані, а їх ваги змінюються у процесі навчання. Деякі входи нейронів відмічені як зовнішні входи, а деякі виходи – як зовнішні виходи мережі. Робота нейронної мережі полягає у перетворенні вхідного вектора X у вихідний вектор Y . Це перетворення задається вагами мережі.

Математична модель нейрона має вигляд:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i x_i + b, \quad (1.38)$$

$$y = f(s),$$

де w_i – вага синапса ($i=1, \dots, n$), b – значення зміщення, s – результат сумування, x_i – компонента вхідного вектора ($i=1, \dots, n$), y – вихідний сигнал нейрона, $f(s)$ – нелінійне перетворення (функція активації чи передаточна функція), n – число входів нейрона. Найчастіше використовується сигмоїдальна передаточна функція:

$$f(s) = \frac{1}{1 + e^{-as}}. \quad (1.39)$$

Для ефективної роботи нейронної мережі її необхідно обучити. У процесі навчання вагові коефіцієнти коректуються до тих пір, поки не будуть досягнені бажані результати ідентифікації вхідних об'єктів.

Існує безліч архітектур нейронних мереж, які відрізняються кількістю шарів, кількістю нейронів, кількістю зв'язків, типом передаточної функції. Вибір архітектури нейронної мережі залежить від вирішуваних задач [45].

1.3.4 Сучасний стан досліджень з дешифрування аерокосмічних сканерних зображень

На сьогодні, класифікація різних типів земної поверхні чи окремих типів об'єктів – це надважливе завдання, яке потребує постійного розвитку нових методів та технологій. Раніше дослідниками у цій області було розроблено методи для дешифрування даних, отриманих супутниками Landsat, WorldView-1, GeoEye, та Ikonos засобами аерозйомки [46, 47]. Ці системи ДЗЗ відрізняються конструкцією, методами фіксації даних та характеристиками отриманих даних.

Класичні методи контрольованої та неконтрольованої класифікації, значно поступаються сучасним методам [48]. На сьогодні, методи

котнтрольованої та некотнтрольованої класифікації часто використовуються у комбінації з іншими методами обробки зображень [49, 50]. Одним з найсучасніших методів є класифікація за допомогою згорточних нейронних мереж та об'єктно-орієнтована класифікація.

Сучасні архітектури нейронних мереж дозволяють вирішувати задачі категоризації зображень [43]. Також, розроблені згорточні нейронні мережі для попиксельної обробки зображень. Вони дозволяють вирішувати такі задачі, як класифікація і сегментація зображень [51]. У роботі [52] представлено високоточний підхід до класифікації супутникових знімків високої просторової роздільної здатності за допомогою згорточної нейронної мережі. У роботі [53] також представлена класифікація ДДЗ за допомогою згорточних нейронних мереж. Класифікація ДДЗ за допомогою нейронних мереж не завжди зручна через потребу великої кількості навчальних даних, та значного часу для навчання мережі.

Ще один ефективний засіб класифікації ДДЗ це об'єктно-орієнтований підхід. Він дозволяє розробити метод, зручний для обробки конкретного типу даних та задач. Цей підхід раніше застосовувався науковцями до різних типів даних, зокрема, у [48] він був застосований для знімків, отриманих супутником Landsat. У роботі [54] цей підхід було застосовано для ідентифікації доріг на знімках, отриманих з супутників WorldView-2 та Ikonos. Об'єктно-орієнтований підхід застосовується для класифікації супутникових знімків у комбінації з системою нечіткого логічного виведення у [50].

1.4 Характеристики зображень, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3

У цій роботі використовувалися супутникові знімки, отримані супутниками WorldView-2 та WorldView-3. WorldView-2 – це перший комерційний апарат з восьмиканальним спектрометром з високою

роздільною здатністю, який включає традиційні спектральні канали, а також чотири додаткових. Вони забезпечують більш високу точність при детальному аналізі стану рослинності, виділення об'єктів, аналізі берегової лінії і прибережної акваторії. За своїми характеристиками WorldView-2 відповідає найвищим вимогам. Дані, одержані за цього супутника, мають середньоквадратичну похибку (СКП) не гірше 4 м без наземних точок прив'язки.

Супутник WorldView-3 призначений для зйомки в панхроматичному і мультиспектральному режимах. Знімальна апаратура повністю аналогічна тій, яка встановлена на супутнику WorldView-2. Точність геопозиціонування в плані становить 6,5 м або 4 м СКП без додаткової корекції планових координат по наземним опорним точкам. WorldView-3 веде зйомку в режимах: VNIR (Visible and Near Infrared) – мультиспектральний видимий і ближній інфрачервоний діапазон, усього 8 каналів; SWIR (Shortwave Infrared) – середній інфрачервоний діапазон, дозволяє вести зйомку крізь серпанок, туман, смог, пил, дим і хмари, усього 8 каналів; CAVIS (clouds, aerosols, vapors, ice, snow) – дозволяє проводити атмосферну корекцію усього 12 каналів з просторовою розрізненістю 30 м в надирі і довжинами хвиль від 0,4 мкм до 2,2 мкм.

Завдання, які вирішуються супутниками WorldView-3 та WorldView-2:

- створення і оновлення топографічних та спеціальних карт і планів до масштабу 1: 5000;
- створення цифрових моделей рельєфу з точністю (1–3) м по висоті;
- інвентаризація та контроль будівництва об'єктів інфраструктури транспортування та видобутку нафти і газу;
- виконання лісовпорядних робіт, точна автоматизована інвентаризація і оцінка стану лісів;
- інвентаризація сільськогосподарських угідь, створення планів землекористування, точне землеробство;

- тонкий моніторинг стану посівів, оцінка засміченості, виявлення шкідників і хвороб сільськогосподарських культур, прогнозування врожайності;
- автоматизоване створення великомасштабних карт і планів рослинності, ландшафтів і природокористування;
- оновлення топографічної підоснови для розробки проєктів генеральних планів перспективного розвитку міст, схем територіального планування муніципальних районів;
- інвентаризація і моніторинг стану транспортних, енергетичних, інформаційних комунікацій;
- широке коло завдань у галузі охорони навколишнього середовища.

Таблиця 1.3 – Основні технічні характеристики знімальної апаратури
WorldView-2

Режим зйомки	Панхроматичний	Мультиспектральний
Спектральний діапазон, мкм	0,50–0,90	0,40–0,45 (фіолетовий або coastal) 0,45–0,51 (синій) 0,51–0,58 (зелений) 0,585–0,625 (жовтий) 0,63–0,69 (червоний) 0,705–0,745 (крайній червоний або red-edge) 0,77–0,895 (ближній ІЧ-1) 0,86–1,04 (ближній ІЧ-2)
Просторова роздільна здатність (в надирі), м	0,46	1,84
Максимальне відхилення від надира, град	40	

Режим зйомки	Панхроматичний	Мультиспектральний
Радіометрична розрізненість , біт/піксель	11	
Точність геопозиціювання, м	CE90 mono = 5	
Ширина полоси зйомки, км	16,4	
Продуктивність зйомки, млн кв. км/добу	0,75	
Періодичність зйомки, діб	1,1–3,7 (в залежності від широти області зйомки)	
Можливість одержання стереопари	Так	
Формат файлів	GeoTIFF, NITF	
Швидкість передачі даних на наземний сегмент, Мбит/с	800	

Таблиця 1.4 – Основні технічні характеристики знімальної апаратури
WorldView-3

Режим зйомки	Панхроматичний	Мультиспектральний
Спектральний діапазон, мкм	0,50–0,90	0,40–0,45 (фіолетовий або coastal) 0,45–0,51 (синій) 0,51–0,58 (зелений) 0,585–0,625 (жовтий) 0,63–0,69 (червоний)

Режим зйомки	Панхроматичний	Мультиспектральний
		0,705–0,745 (крайній червоний або red-edge) 0,77–0,895 (ближній ИК-1) 0,86–1,04 (ближній ИК-2)
Просторова розрізненість (в надирі), м	0,31	1,24
Максимальне відхилення від надира, град	40	
Радіометрична роздільна здатність , біт/піксель	11	
Точність геопозиціювання, м	CE90 mono = 3,5	
Ширина полоси зйомки, км	13,1	
Продуктивність зйомки, млн кв. км/добу	0,68	
Періодичність зйомки, діб	1	
Можливість одержання стереопари	Так	
Формат файлів	GeoTIFF, NITF	
Швидкість передачі даних на наземний сегмент, Мбит/с	800	

1.5 Постановка проблеми

Фотограмметричні зображення високої просторової розрізненості, що отримуються супутниками, надзвичайно важливі у багатьох галузях людської діяльності [55, 56]. Технології отримання даних постійно вдосконалюються, змінюється просторова розрізненість та спектральний діапазон, у якому отримуються дані. З появою нових супутників, обладнаних ПЗЗ-сканерами, що спроможні отримувати зображення із просторовою розрізненістю 0,46 м та 0,31 м на піксель, виникає потреба створення нових систем, методів, технологій, попередньої обробки, дешифрування та аналізу.

На сьогоднішній день створено багато методів обробки фотограмметричних сканерних зображень, які основані на різних теоретичних підходах. Різними науковцями були досліджені методи ідентифікації та компенсації тіней [57]. Методи ідентифікації тіней мають свої недоліки та застосовувалися до даних ДЗЗ з різними характеристиками та просторовою розрізненістю [58]. При застосуванні до знімків з високою просторовою розрізненістю, ці методи показали невисоку точність. Процеси формування багатовимірних фотограмметричних зображень залежать від факторів, таких як геометрія формування зображень та типу скануючої системи. Це дає підстави для означення сутності науково-технічного завдання, що вирішується в даній дисертаційній роботі: розробка нових і удосконалення відомих методів попередньої обробки та геометричної корекції багатовимірних сканерних зображень.

Одним з найбільш затребуваних напрямків обробки ДДЗ є їх дешифрування та аналіз. На теперішній час існує безліч реалізацій методів дешифрування ДДЗ, основаних на різних технологіях та підходах [21]. Дешифрування ДДЗ – це складний процес, що включає у себе такі задачі, як визначення ознак, за якими буде проводитися аналіз, вибір моделі чи метода класифікації.

У зв'язку з цим, виникає потреба створення методів, які дозволяють виконувати весь цикл обробки зображень: аналіз, ідентифікація окремих об'єктів і класифікація всього зображення. Тому особливу значущість набуває також проблема створення нової технології обробки фотограмметричних супутникових зображень високої просторової розрізненості, отриманих у видимій та ближній інфрачервоній ділянках спектру.

1.6 Висновки до розділу

1. У розділі розглянуто існуючі системи ДЗЗ, принципи формоутворення багатовимірних фотограмметричних зображень та їх основні характеристики.

2. Розглянуто існуючі методи попередньої обробки, підвищення інформативності та геометричної корекції багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості. Аналіз наведених у розділі методів дозволяє встановити недоліки цих методів відносно супутникових зображень, отриманих сучасними системами ДЗЗ.

3. Досліджено існуючі методи дешифрування, класифікації та ідентифікації об'єктів на фотограмметричних зображеннях, отриманих сучасними системами ДЗЗ.

4. На основі проведеного дослідження стану розвитку сфери обробки даних ДЗЗ та засобів їх отримання, сформульовано проблеми та задачі дисертаційної роботи.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора: [1, 4, 12].

РОЗДІЛ 2 ДЕШИФРУВАННЯ ДДЗ НА ОСНОВІ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОГО ПІДХОДУ

2.1 Тематична класифікація та ідентифікація об'єктів на багатовимірних зображеннях високої просторової розрізненості

У цьому розділі вирішуються такі задачі дешифрування ДДЗ, як тематична класифікація супутникових знімків та ідентифікація об'єктів. Задача ідентифікації полягає у знаходженні на супутниковому знімку окремих об'єктів або груп об'єктів одного типу [6, 14].

Метою класифікації зображення є отримання тематичної карти земної поверхні. Задача класифікації зображення полягає у тому, що кожний з пікселів зображення, представлений вектором значень – x_{ij} у N спектральних каналах, відноситься до одного з класів. Як правило, класи визначаються заздалегідь і відповідають різним типам об'єктів земної поверхні.

Задачі класифікації та ідентифікації об'єктів тісно пов'язані між собою, оскільки для отримання тематичної карти місцевості, необхідно виконати точну ідентифікацію всіх типів об'єктів, присутніх на знімку. У роботі розроблено технологію дешифрування супутникових знімків високої та надвисокої просторової розрізненості, яка дозволяє проводити класифікацію цілого знімка, або ідентифікувати певні класи об'єктів. Використані у роботі знімки, отримані супутниками WorldView-2 та WorldView-3, мають просторову розрізненість 1,84 м та 1,24 м у мультиспектральних каналах та 46 см та 31 см у панхроматичних каналах відповідно. Надвисока просторова розрізненість дозволяє точно ідентифікувати границі об'єктів на земній поверхні та врахувати їх геометричні властивості при класифікації [17].

2.2 Об'єктно-орієнтований підхід до аналізу та дешифрування багатовимірних зображень високої просторової розрізненості

На сьогодні, об'єктно-орієнтований підхід є одним з найефективніших засобів класифікації та аналізу супутникових знімків високої просторової розрізненості [25]. На відміну від піксельно-орієнтованого підходу [59], у ході обробки зображення аналізуються не окремі пікселі, а окремі групи пікселів, т. з. об'єкти чи сегменти, отримані у наслідок сегментації зображення. При такому підході, у якості властивостей зображення, що будуть використовуватися при класифікації, можуть виступати не тільки вектори значень окремих пікселів, а також властивості об'єктів. Можуть бути використані статистичні, просторові, геометричні, спектральні та текстурні властивості [14].

Процес класифікації знімків за допомогою об'єктно-орієнтованого підходу можна поділити на наступні етапи (рис. 2.1):

Попередня обробка знімка. На цьому етапі відбувається покращення якості вхідного зображення. Застосовуються методи геометричної, радіометричної та атмосферної корекції, усунення шумів, підвищення просторової роздільної здатності.

Сегментація зображення. На цьому етапі отримуються об'єкти для аналізу. За допомогою спеціальних методів сегментації зображення ділиться на області (сегменти), де пікселі мають схожі значення [3].

Покращення сегментації. В залежності від обраного методу сегментації та його параметрів, після його застосування можуть утворюватися сегменти, чий розмір занадто малий. Вони можуть бути спричинені шумами, вибором неоптимальних параметрів сегментації чи властивостями об'єктів на зображенні. Велика кількість таких сегментів ускладнює процес аналізу, тому застосовуються методи усунення сегментів, чий розмір менший, ніж задане мінімальне значення [4].

Розрахунок властивостей сегментів. Для усіх отриманих сегментів зображення розраховуються різні типи властивостей.

Класифікація зображення. На цьому етапі відбувається прийняття рішення, до якого з заздалегідь оголошених класів відноситься сегмент. Для цього можуть бути обрані різні методи та моделі класифікації.



Рисунок 2.1 – Головні етапи класифікації зображення на основі об'єктно-орієнтованого підходу

2.3 Запропонована технологія дешифрування супутникових знімків високої просторової розрізненості

У роботі розроблено автоматизовану технологію дешифрування супутникових знімків високої просторової розрізненості. Розроблену технологію побудовано на основі об'єктно-орієнтованого підходу.

Зазвичай на супутникових знімках присутні декілька розповсюджених 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 дає можливість використовувати спектральну інформацію про об'єкти на знімках.

Структура запропонованої технології представлена на рис. 2.2. На етапі попередньої обробки виконано радіометричну корекцію та підвищення просторової розрізненості вхідних даних. Для підвищення просторової розрізненості виконано злиття 8 мультиспектральних каналів знімків з панхроматичним каналом. Для цього застосовано технологію, розроблену у [12].

На етапі сегментації до вхідних даних було застосовано різні методи сегментації, що широко застосовуються при обробці супутникових знімків. Щоб отримати зручний для подальшого аналізу результат сегментації, застосовується процедура покращення сегментації. Його суть в тому, що якщо після обробки залишалися сегменти малого розміру ((1–15) пікселів), проводилось злиття цих сегментів з сусідніми сегментами.

Для прийняття рішення про класи сегментів зображення 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 [50, 54]. Правила сформовані з врахуванням фізичних властивостей кожного класу. Вектори

властивостей сегментів узято за вхідну інформацію для системи нечіткого виведення. Для цього були розраховані властивості об'єктів зображення, отриманих на етапі сегментації.

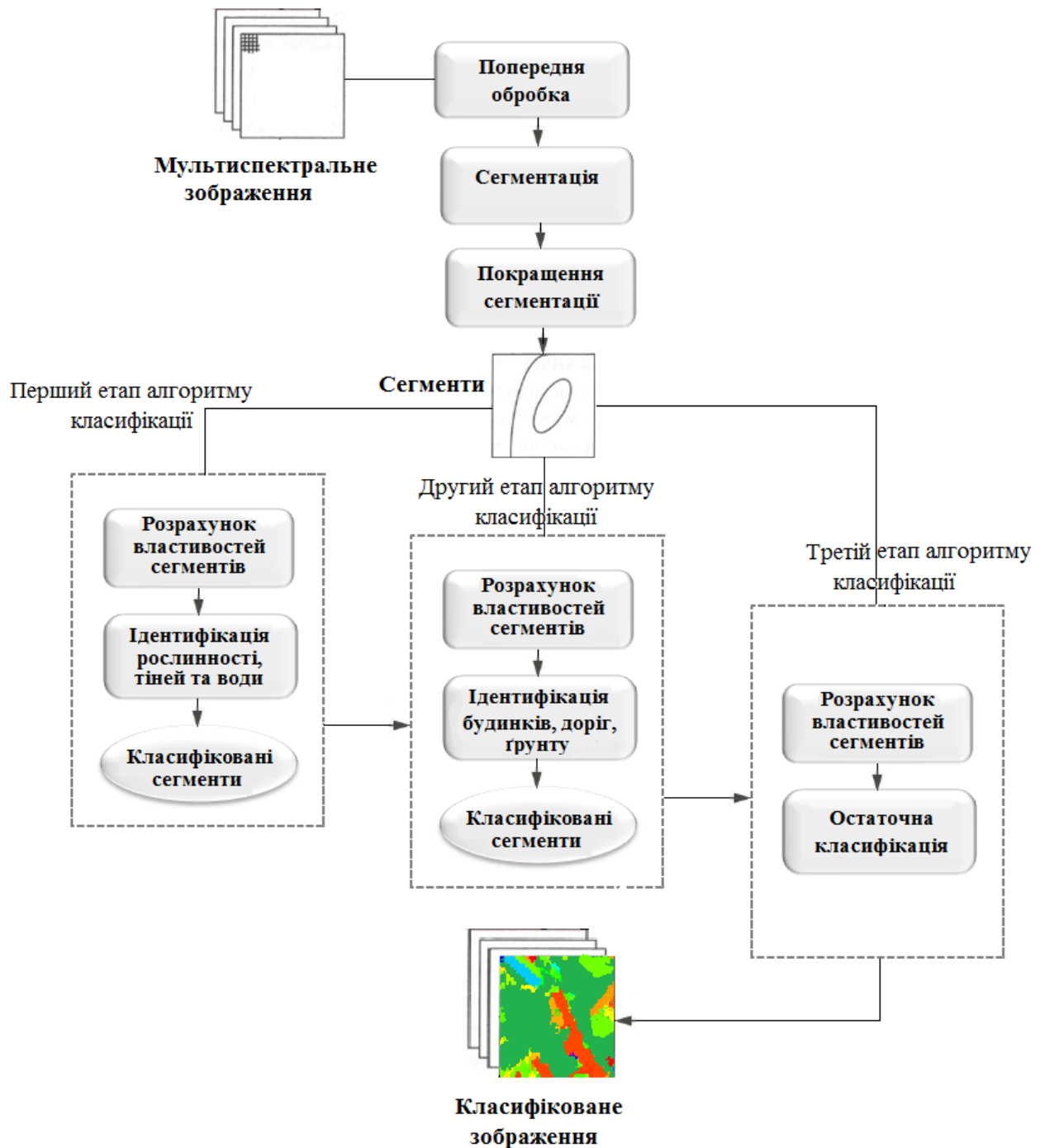


Рисунок 2.2 – Схема розробленої технології дешифрування зображень

2.4 Методи сегментації зображень

Сегментація зображення – процес розбиття зображення на однорідні ділянки, які містять пікселі зі схожими характеристиками. Сегментація зображення є ключовим етапом обробки зображення, що впливає на подальший розрахунок властивостей об'єктів зображення та результат класифікації [60, 61]. Щоб отримати найбільш точний результат, необхідно обрати найкращий для вирішуваної задачі метод сегментації та його параметри.

Методи сегментації можливо поділити на автоматичні та інтерактивні, що потребують участі користувача. Автоматичні методи також поділяються на два класи: 1) виділення областей зображення з певними властивостями, специфічними для конкретної предметної області (маркерні методи, бінаризація); 2) розбиття зображення на однорідні області. Методи, що розбивають зображення на однорідні області, є найбільш універсальними, оскільки вони не орієнтовані на одну предметну область та специфічні задачі аналізу. Такі алгоритми найбільш розповсюджені у галузі комп'ютерного зору, до них відносяться методи водорозділу [62], метод виділення границь [63], методи, основані на кластеризації багатовимірної гістограми.

У запропонованій технології, на етапі сегментації було застосовано наступні методи сегментації: сегментація методом зсуву середнього, багатомасштабна сегментація та сегментація на основі методу кластеризації К-середніх. Про якісну роботу досліджених методів сегментації свідчать роботи, у яких використані методи також були застосовані до аналізу зображень та даних ДЗЗ. Для методів сегментації немає одного об'єктивного критерія оцінки якості сегментації. Вибір найкращого методу залежить від поставлених задач. Також для порівняння якості роботи методів сегментації існують бази зображень, для яких відома “еталонна” сегментація [64]. Однією з задач, що вирішуються у розділі, є визначення того, які методи сегментації, при яких параметрах найбільш підходять для застосування при

класифікації багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості.

2.4.1 Сегментація методом зсуву середнього

Головна ідея сегментації методом зсуву середнього (Mean-shift) полягає у знаходженні локальних максимумів функції щільності розподілу даних у просторі ознак RGBXY [65]. Робиться припущення про те, що локальні максимуми щільності відповідають центрам кластерів. Щільність оцінюється як сумарний вплив елементів, вплив кожного елемента описується функцією (ядром) $K(x)$, яка залежить від відстані до елемента. Для елемента зображення x , який представлений d -вимірним вектором ознак, формула для оцінки щільності $f(x)$ з параметром згладжування h , має вигляд:

$$f(x) = \frac{1}{Nh^d} \sum_{i=1}^N K\left(\frac{x - x_i}{h}\right), \quad (2.1)$$

N – кількість пікселів, у якості ядра $K(x)$ можливо застосовувати класичне ядро Гауса:

$$K_G(x) = (2\pi)^{-d/2} \exp\left(-\frac{1}{2}\|x\|^2\right). \quad (2.2)$$

Однак на практиці, з метою мінімізації обчислювальних витрат, застосовують обмежені ядра, такі як ядро Єпанечнікова:

$$K_E(x) = \begin{cases} \frac{1}{2} c_d^{-1} (d+2) (1 - \|x\|^2), & x \in [0,1] \\ 0, & x \notin [0,1] \end{cases}, \quad (2.3)$$

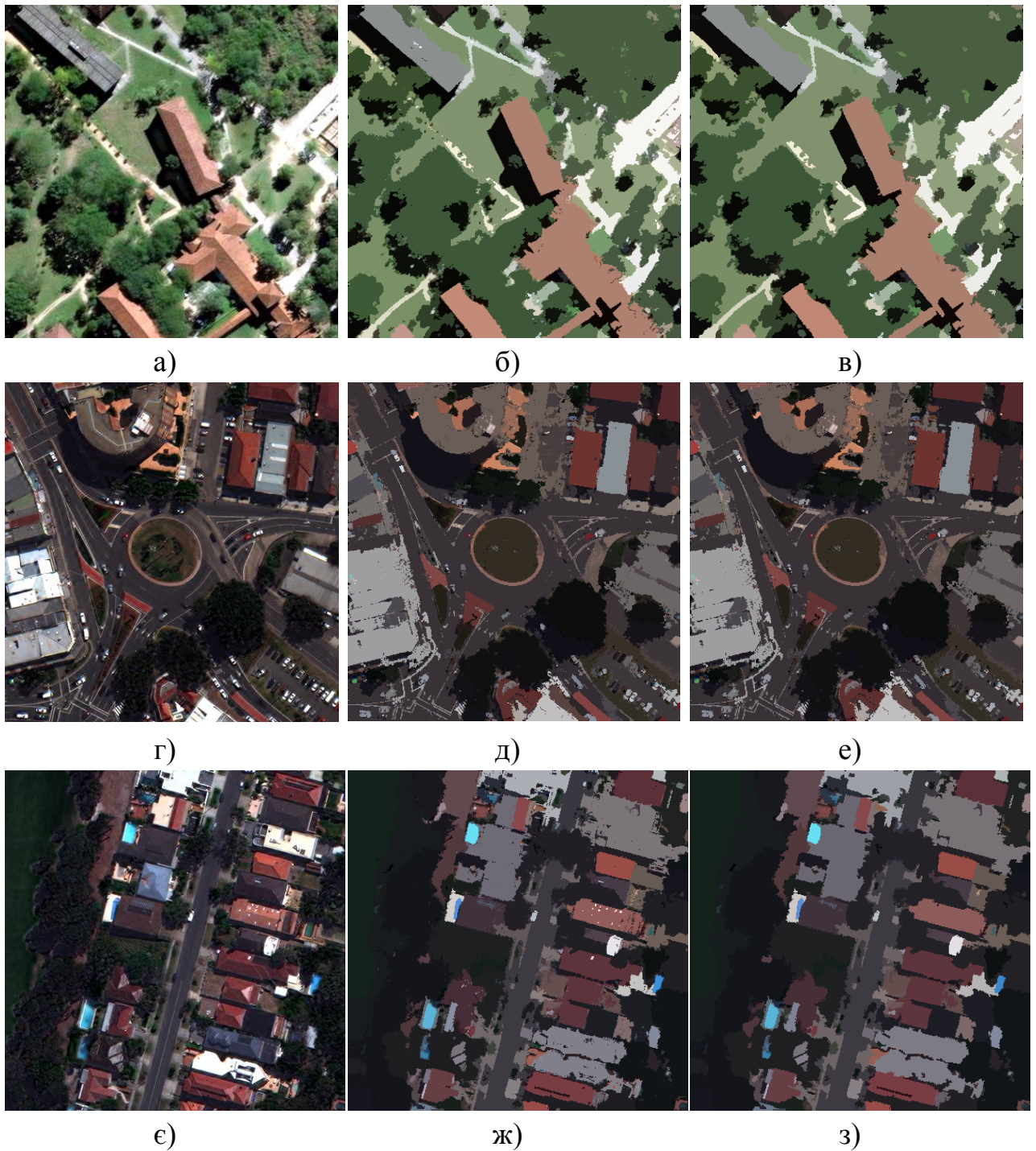
де c_d – об’єм одиничної d -вимірної сфери. Елементи зображення відносяться до того чи іншого кластеру за допомогою процедури зсуву середнього (Mean-shift). Щоб визначити, до якого з кластерів відноситься піксель, треба рухатися за градієнтом функції щільності $f(x)$. Для оцінки градієнту функції щільності розраховується вектор зсуву середнього, що сходиться до відповідного локального максимуму:

$$M(x) = m(x) - x, \quad m(x) = \frac{\sum_{i=1}^N x_i K(x - x_i)}{\sum_{i=1}^N K(x - x_i)}, \quad (2.4)$$

$m(x)$ – зважене середнє щільності у вікні, що визначається функцією ядра $K(x)$. Ітеративний процес починається з точки x_0 , послідовно переміщуючись у точку зсуву $x_{i+1} = m(x_i)$, доки $m(x)$ не сходиться. Пікселі, що прийшли до одного локального максимуму, групуються у сегмент.

У використаній реалізації методу сегментації пікселі представлені ознаками кольору та просторовими ознаками. Просторові ознаки можуть мати діапазон значень, відмінний від діапазону значень ознак кольору, тому вхідними параметрами сегментації є просторовий радіус r_1 та радіус кольору r_2 . Поріг сходимості $t=0,25$.

До оброблених фрагментів супутникових зображень №1, №2 та №3 (рис. 2.3) було застосовано метод сегментації зсуву середнього з використанням різних вхідних параметрів та подальше покращення сегментації. У таблиці 2.1 наведено параметри, за якими були оброблені зображення, та кількість сегментів до покращення сегментації (4 стовпчик) та після (5 стовпчик).



а) фрагмент супутникового знімка №1; б) результат сегментації знімка №1 методом “Mean-Shift”; в) результат після покращення сегментації; г) фрагмент супутникового знімка №2; д) результат сегментації знімка №2 методом “Mean-Shift”; е) результат після покращення сегментації; є) фрагмент супутникового знімка №3; ж) результат сегментації знімка №3 методом “Mean-Shift”; з) результат після покращення сегментації

Рисунок 2.3 – Сегментація зображення методом “Mean-Shift”

Таблиця 2.1 – Параметри, застосовані при сегментації зображень, та кількість сегментів

	r1	r2	n сегментів	n сегментів
Знімок 1	10	40	2742	233
Знімок 1	10	70	1711	170
Знімок 1	20	40	4546	317
Знімок 2	10	40	5108	583
Знімок 2	10	70	3883	553
Знімок 2	20	40	5041	534
Знімок 3	2	40	2582	463
Знімок 3	10	40	2673	233
Знімок 3	20	40	2799	227

2.4.2 Метод багатомасштабної сегментації

Метод багатомасштабної сегментації (Multiresolution segmentation) базується на техніці послідовного злиття сусідніх елементів зображення. Це оптимізаційна процедура, що мінімізує середню неоднорідність об'єктів зображення [66, 67].

Сегментація починається з одного об'єкта зображення та послідовно об'єднує його з сусідніми об'єктами, поки верхній поріг однорідності не буде досягнутий. Коли поріг досягнуто і об'єкт більше не може бути об'єднаний з сусідніми об'єктами, один з сусідніх об'єктів стає начальним і процедура знов повторюється. Процес циклічно повторюється, доки об'єднання об'єктів зображення можливе. Критерій однорідності визначається як комбінація спектральної однорідності та однорідності форми.

У заданому d -вимірному просторі ознак, два об'єкти зображення f_{1d} та f_{2d} вважаються схожими, якщо їх ознаки у просторі ознак знаходяться на близькій відстані. Ступінь схожості об'єктів можна виразити як:

$$h = \sqrt{\sum_d (f_{1d} - f_{2d})^2}. \quad (2.5)$$

У разі об'єднання об'єктів зображення в один більший об'єкт, середня спектральна однорідність всього зображення зменшується. Мета оптимізаційної процедури – мінімізація зменшення однорідності пов'язаного з обробкою кожного об'єкту зображення. Об'єкт зливається з тим сусіднім об'єктом, при об'єднанні з яким зменшення однорідності мінімальне.

Ступінь сумісності двох сусідніх об'єктів з однорідністю h_1 та h_2 зображення визначається зміною однорідності h_{diff} до та після потенційного об'єднання h_m . Після злиття h_{diff} повинне бути мінімальним.

$$h_{diff} = h_m - \frac{h_1 + h_2}{2}. \quad (2.6)$$

Коли значення h_{diff} перевищує заданий поріг, злиття об'єктів не відбувається. Поріг злиття є головним параметром сегментації, зазвичай він задається користувачем. Цей параметр також зветься *параметром масштабу*, тому що він впливає на розмір сегментів. Чим вищий параметр масштабу, тим більші за розміром сегменти, чим нижчий – тим менші сегменти. Цей параметр являє собою композицію однорідності форми h_f та однорідності h_c кольору.

У процесі сегментації враховуються наступні види однорідності:

- 1) однорідність кольору: сума середніх відхилень значень пікселів об'єктів по всіх каналах;
- 2) однорідність форми: відносне відхилення довжини границі об'єкту по відношенню до довжини найкомпактнішої фігури, визначається за допомогою наступних критеріїв:
 - а) критерій гладкості: відношення між довжиною границі об'єкта l та довжиною границі обмежуючого прямокутника b :

$$S = \frac{l}{b}; \quad (2.7)$$

б) критерій компактності: відхилення від ідеальної форми, що визначається відношенням між довжиною об'єкта l та коренем від розміру об'єкта n :

$$C = \frac{l}{\sqrt{n}}. \quad (2.8)$$

Однорідність форми h_f залежить від критеріїв гладкості S (smoothness) та компактності C (compactness) наступним чином:

$$h_f = (1 - w_f)S + w_f C. \quad (2.9)$$

Критерій однорідності h для кожного об'єкту зображення визначається однорідністю форми h_f та однорідністю h_c кольору:

$$h = (1 - w_c)h_c + w_c h_f, \quad (2.10)$$

де w_c , w_f – вагові коефіцієнти.

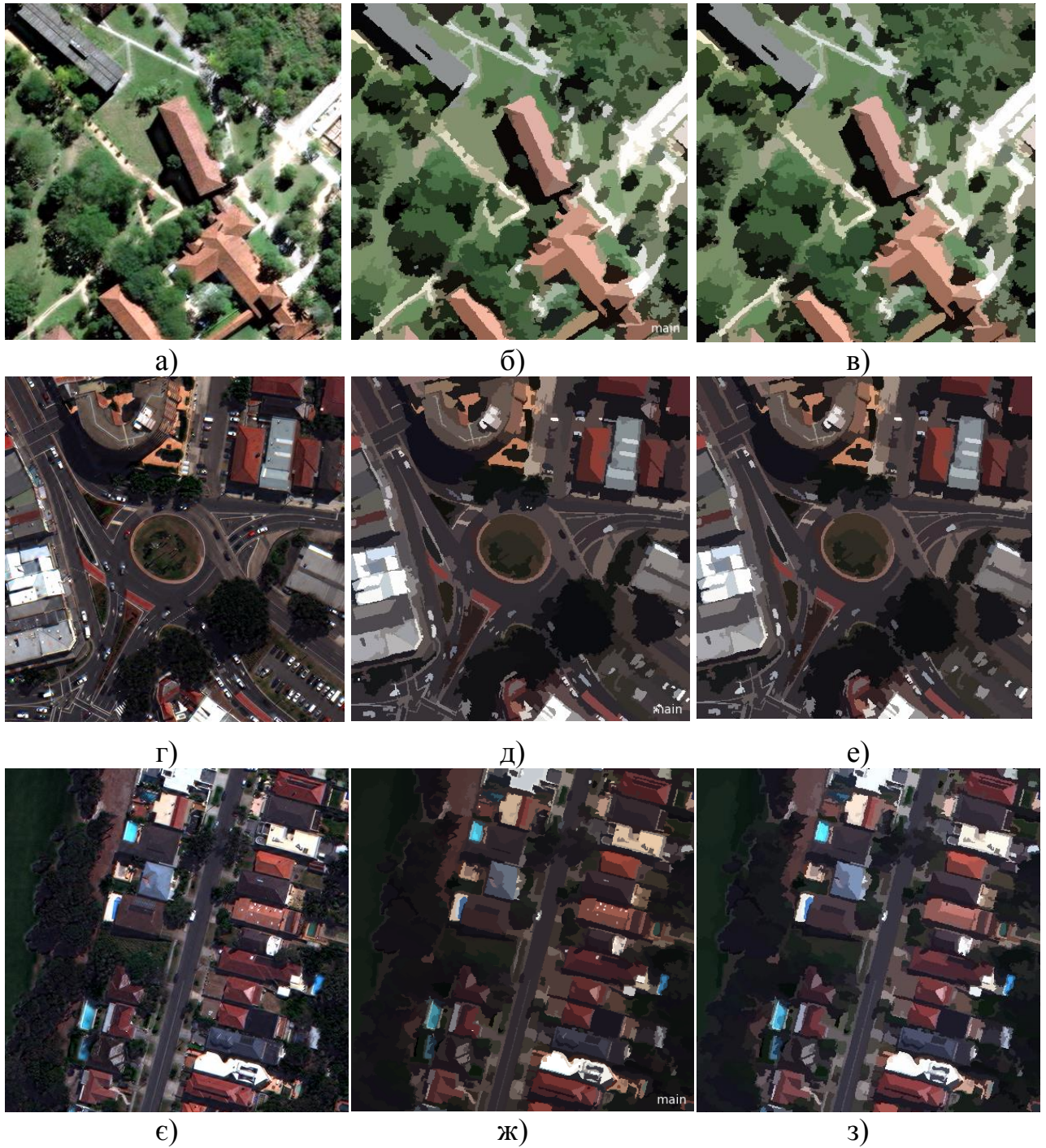
До тестових фрагментів супутникових (рис. 2.4) знімків було застосовано метод багатомасштабної сегментації. Сегментацію було виконано при різних значеннях параметра масштабу h . У таблиці 2.2 наведено значення параметра, за яким було оброблено зображення та кількість сегментів до покращення сегментації (3 стовпчик) та після (4 стовпчик). На рисунку 2.4 показано результати сегментації методом багатомасштабної сегментації трьох супутникових знімків та результати покращення результатів сегментації.

Таблиця 2.2 – Значення параметра h при сегментації зображень та кількість сегментів

	h	n сегментів	n сегментів
Знімок 1	10	4847	3071
Знімок 1	30	894	737
Знімок 1	50	457	391
Знімок 2	20	1304	941
Знімок 2	40	1243	910
Знімок 2	60	720	522
Знімок 3	20	3742	2485
Знімок 3	40	1200	966
Знімок 3	60	698	534

2.4.3 Сегментація зображення на основі методу кластеризації К-середніх

Реалізовано сегментацію зображень на базі методу кластеризації К-середніх (K-means). У методі кластеризації К-середніх спочатку випадковим чином задається початкове математичне очікування для кожного з K кластерів. Кожен піксель з оброблюваного набору даних назначається класу, математичне очікування якого найближче до значення пікселя. Таким чином утворюються перші кластери. Нові математичні очікування кластерів знаходяться з поточної класифікації, а пікселі перепризначаються. На кожній ітерації К-середні будуть наближатися до скупчення даних в середині призначеної їм області простору ознак. Ітерації продовжуються доки в призначені пікселів на двох послідовних ітераціях не буде спостерігатися суттєвих змін.



а) фрагмент супутникового знімка №1; б) результат сегментації знімка №1 методом “Multiresolution”; в) результат після покращення сегментації;
 г) фрагмент супутникового знімка №2; д) результат сегментації знімка №2 методом “Multiresolution”; е) результат після покращення сегментації;
 є) фрагмент супутникового знімка №3; ж) результат сегментації знімка №3 методом “Multiresolution”; з) результат після покращення сегментації

Рисунок 2.4 – Сегментація зображення методом “Multiresolution”

Критерій закінчення ітеративного процесу може бути визначений у термінах *чистої середньої міграції* від одної ітерації до наступної. А саме, це значення зміни векторів математичних очікувань від $i-1$ ітерації до i -ї ітерації, просумованих по усім K -кластерам.

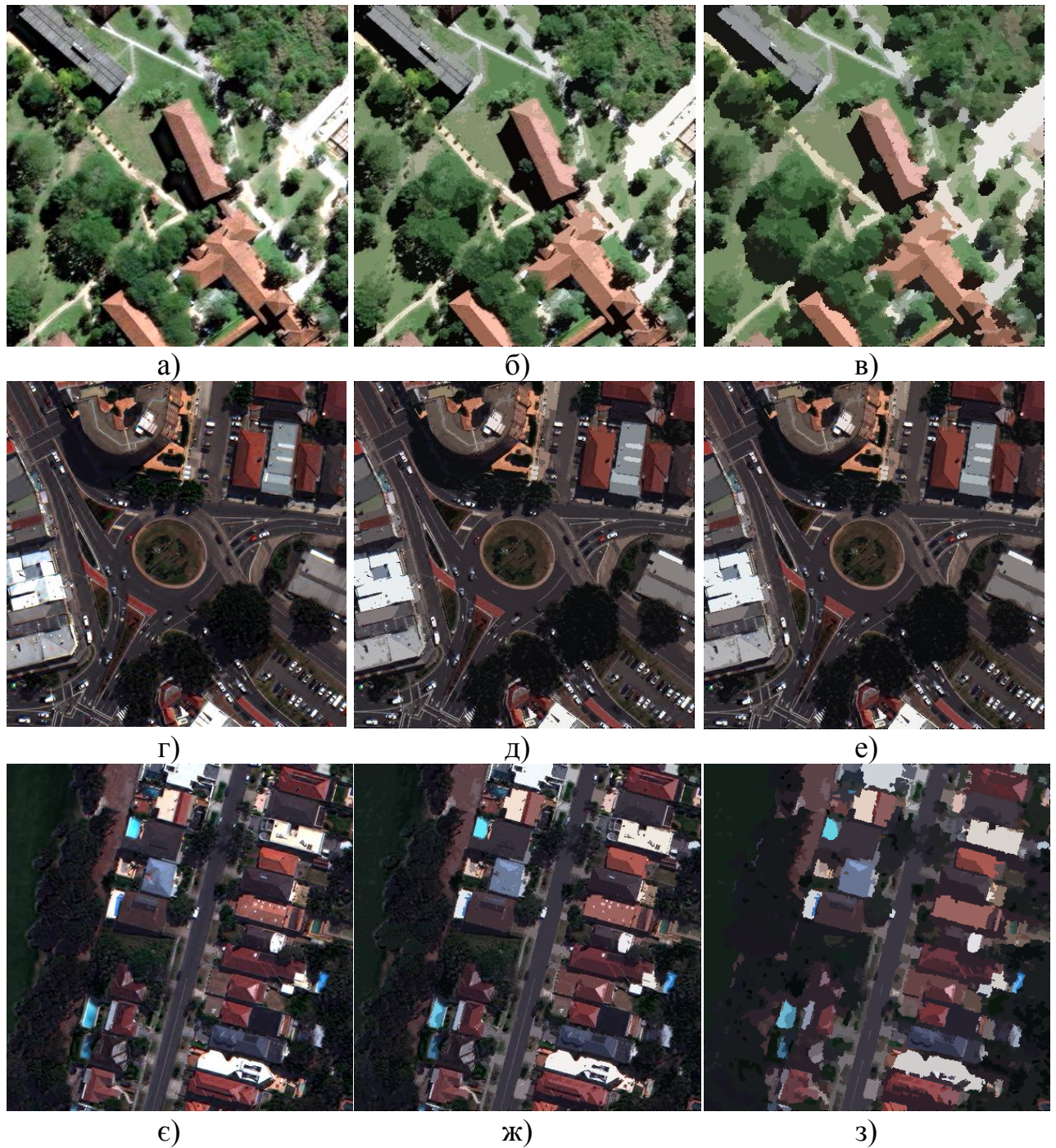
$$\Delta\mu(i) = \sum_{k=1}^K |\mu_k^i - \mu_k^{i-1}|. \quad (2.11)$$

Кінцевий результат не залежить від вибору початкових векторів, але при цьому може знадобитися більше ітерацій для сходимості, якщо кінцеві вектори не близькі до початкових.

У якості вхідних параметрів було взято кількість кластерів K та число ітерацій i . Результати сегментації показано на рис. 2.5. Для отримання сегментів, до результату, отриманого після кластеризації, було застосовано пошук зв'язних компонент зображення [31]. У таблиці 2.3 показано кількість сегментів після застосування сегментації, виконаної на базі кластеризації K -середніх, до трьох супутникових знімків (4 стовпчик) та після покращення результату сегментації (5 стовпчик). Результат обробки тестових зображень показав, що при збільшенні кількості ітерацій початкова кількість сегментів та кількість сегментів після покращення сегментації змінюються не суттєво.

Таблиця 2.3 – Параметри застосовані при сегментації зображень та кількість сегментів.

	K	I	n сегментів	n сегментів
Знімок 1	7	1	17041	1143
Знімок 1	7	10	13634	1070
Знімок 2	7	1	20627	1209
Знімок 2	7	10	17354	1126
Знімок 3	7	1	14166	904
Знімок 3	7	10	12135	970



а) фрагмент супутникового знімка №1; б) результат сегментації знімка №1 методом К-середніх; в) результат після покращення сегментації; г) фрагмент супутникового знімка №2; д) результат сегментації знімка №2 методом К-середніх; е) результат після покращення сегментації; є) фрагмент супутникового знімка №3; ж) результат сегментації знімка №3 методом К-середніх; з) результат після покращення сегментації

Рисунок 2.5 – Сегментація зображення методом К-середніх

2.5 Розрахунок властивостей сегментів

У багатьох задачах, пов'язаних з обробкою цифрових зображень, виникає потреба опису зображень за їх властивостями. Властивості об'єкта – це його якісні та кількісні характеристики. У різних задачах один й той самий об'єкт може описуватися різними множинами властивостей. Вибір властивостей, що описують зображення або окремий об'єкт на зображенні, залежить від поставленої задачі. Множина властивостей об'єкта зображення представляється у вигляді вектора [4, 68].

Для класифікації сегментів супутникових зображень необхідно обчислити їх властивості. У розробленій технології на етапі розрахунку властивостей сегментів були використані властивості, які можна поділити на наступні групи [3]:

- геометричні властивості;
- статистичні;
- текстурні;
- спектральні;
- просторові;

2.5.1 Геометричні властивості об'єктів

Геометричні властивості описують форму об'єкта (сегмента), вони розраховуються по пікселям, що належать до об'єкта.

Розмір об'єкта – це число пікселів, що формують об'єкт.

Площа об'єкта може бути обчислена, якщо відома просторова роздільна здатність знімка за кількістю пікселів. Якщо інформація про знімок відсутня, площа пікселя приймається за 1, площа об'єкта дорівнює кількості пікселів [4].

$$A_k = P_k \cdot u^2, \quad (2.12)$$

A_k – площа об'єкта; P_k – кількість пікселів; k – кількість сегментів зображення, що формують об'єкт; u^2 – розмір пікселя в одиницях вимірювання відстані на знімку.

Довжина границі об'єкта – кількість пікселів, що лежать на границі об'єкта. Границя об'єкта характеризує його форму [4].

Компактність об'єкта – чисельна величина, яка відображує ступінь компактності фігури. Компактність об'єктів зображення широко застосовується для аналізу ДДЗ [69, 70, 71]. У роботі застосовано загальновідому формулу для визначення компактності:

$$C_{IPQ} = \frac{4\pi A_k}{B_k^2}, \quad (2.13)$$

де B_k – довжина границі об'єкта в одиницях вимірювання відстані на знімку. Діапазон значень: $C_{IPQ} \in (0,1]$. Чим більше значення C_{IPQ} , тим компактніша фігура.

Прямокутність об'єкта – властивість, яка показує наскільки форма об'єкта відповідає прямокутнику [4]. Для того, щоб обчислити ступінь прямокутності об'єкта, треба побудувати для нього мінімальний обмежуючий прямокутник. Програмна реалізація побудови обмежуючого прямокутника базується на алгоритмі, представленому у [72], широко застосовується при аналізі форми об'єктів [73]. У даному алгоритмі навколо фігури будується опуклий полігон ліній, одна з сторін якого буде колінеарна до сторони мінімального обмежуючого прямокутника.

Ступінь прямокутності R об'єкта оцінюється як відношення площі об'єкта A_k до площі обмежуючого прямокутника A_R :

$$R = \frac{A_k}{A_R}, \quad R \in (0,1] \quad (2.14)$$

Довжина об'єкта. За довжину об'єкта взято довжину більшої сторони обмежуючого прямокутника.

Ширина об'єкта. За ширину об'єкта взято довжину меншої сторони обмежуючого прямокутника.

Відношення довжини границі до площі об'єкта – довжина границі об'єкта в одиницях вимірювання відстані на знімку, поділена на A_k .

2.5.2 Просторові властивості об'єктів

Просторові властивості описують розташування об'єктів зображення, наявність спільної границі між сегментами. Для обчислення просторових властивостей було побудовано матрицю суміжності M сегментів зображення. Розмір матриці k на k , де k – кількість сегментів зображення. Елемент матриці M_{ij} містить довжину спільної границі між i та j об'єктами зображення.

Наявність спільної границі – властивість, що показує чи межують сегменти між собою.

Довжина спільної границі – властивість, що показує довжину спільної границі між двома сусідніми сегментами [4].

2.5.3 Спектральні властивості об'єктів

У якості спектральних властивостей сегментів були розраховані значення спектральних індексів, що дозволяють точно ідентифікувати рослинність, тіні та воду [3, 74].

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – нормалізований відносний індекс ідентифікації рослинності, відображує кількість рослинної

біомаси, здатної до фотосинтезу [75]. Один з найпоширеніших та точних вегетаційних індексів, що використовуються при обробці ДДЗ [4].

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}}, \quad (2.15)$$

де NIR – відбиття світла у ближній інфрачервоній ділянці спектра, а RED – відбиття у червоній області спектра, відповідно 8 та 5 канали знімків, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3. Розрахунок NDVI базується на двох найбільш стабільних ділянках спектральної кривої відбивної здатності зелених рослин. У червоній ділянці спектра ((0,6–0,7) мкм) знаходиться максимум поглинання сонячного випромінювання хлорофілом зелених рослин, а в інфрачервоній ((0,7–1,0) мкм) знаходиться максимум відбиття випромінювання.

Індекс приймає значення від -1 до 1. Для рослинності NDVI приймає позитивні значення: чим більше рослинної біомаси, тим він вищий. На значення індексу також впливає вид рослинності, її густина, експозиція, кут нахилу, тип ґрунту під розрідженою рослинністю. Густій рослинності відповідають значення NDVI від 0,7 до 1, а розрідженій рослинності значення від 0,5 до 0,7.

NDWI (Normalized Difference Water Index) – спектральний індекс для ідентифікації водних поверхонь [76, 77, 78].

$$\text{NDWI} = \frac{\text{GREEN} - \text{NIR}}{\text{GREEN} + \text{NIR}}, \quad (2.16)$$

де NIR – відбиття світла у ближній інфрачервоній ділянці спектра, а GREEN – відбиття у зеленій ділянці спектра, відповідно 8 та 3 канали для знімків, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3. Дані спектральні діапазони були обрані, щоб максимізувати відбиття водними поверхнями

хвиль зеленої ділянки спектра та мінімізувати низьке відбиття хвиль у ближній інфрачервоній ділянці спектра. Індекс приймає значення від -1 до 1, водні поверхні характеризуються позитивними значеннями NDWI.

NSVDI (normalized saturation-value difference index) – нормалізований індекс ідентифікації тіні:

$$\text{NSVDI} = \frac{S - V}{S + V}, \quad (2.17)$$

де S – насиченість зображення, V – яскравість. Щоб отримати компоненти зображення S та V , воно трансформується з кольорової моделі RGB у кольорову модель HSV. NSVDI приймає значення від -1 до 1, тіньові ділянки мають високі значення індекса.

Яскравість об'єкта – значення яскравості сегмента у кольоровій моделі HSV (компонента V).

Насиченість об'єкта – значення насиченості сегмента у кольоровій моделі HSV (компонента S).

Колір об'єкта – значення кольору сегмента у кольоровій моделі HSV (компонента H).

2.5.4 Статистичні властивості об'єктів

Середнє значення пікселів об'єкта розраховується по усім пікселям, що належать k -му сегменту зображення. Розраховується окремо для кожного каналу зображення.

$$\mu(k) = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} x_i, \quad (2.18)$$

де N_k – кількість пікселів у k -му сегменті, x_i – значення i -того пікселя сегмента.

Середньоквадратичне відхилення пікселів об'єкта розраховується по усім пікселям, що належать k -му сегменту зображення. Розраховується окремо для кожного каналу зображення.

$$\sigma(k) = \sqrt{\frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} x_i^2 - \mu^2(k)}, \quad (2.19)$$

де N_k – кількість пікселів у k -му сегменті, x_i – значення i -того пікселя сегмента.

2.5.5 Текстурні властивості об'єктів

Контури зображення є однією з текстурних властивостей [79], що може застосовуватися безпосередньо для аналізу зображення або у складі більш складних алгоритмів. Контури відображують різкі просторові зміни у значеннях пікселів, що зазвичай відповідають фізичним границям на знімку. Для знаходження контурів зображення використовуються градієнтні фільтри.

Яскравість контурів на границі сегмента було використано як текстурну властивість зображення. Розрахунок цієї властивості складається з наступних кроків:

- 1) Застосування градієнтного фільтру Робертса для знаходження контурів об'єктів на зображенні. Для фільтрації було обрано червоний канал зображення тому, що на червону ділянку спектру приходиться максимум поглинання сонячного випромінення хлорофілом зелених рослин [75]. Це призводить до меншого віддзеркалення випромінення, тому рослини у червоному каналі виглядають темнішими за інші об'єкти і не будуть заважати у подальшій роботі.

2) Отримане на другому кроці зображення оброблюємо за допомогою фільтру низьких частот, щоб позбутися шумів та дрібних деталей. Потім засобами гістограмної обробки підвищуємо контрастність знімка, завдяки чому залишаються лише найбільш яскраві границі.

3) Розрахунок середнього значення градієнта для пікселів, що належать до границі сегмента.

2.6 Класифікація

В результаті класифікації зображення об'єкти, отримані в результаті сегментації, відносяться до одного з наступних класів: будівлі, дороги, дерева, трава, ґрунт, вода, тіні. Об'єкти, що відносяться до класів рослин та води, найбільш легко ідентифікувати за допомогою спектральних властивостей. Більш складною задачею є ідентифікація доріг та будинків, через те, що вони мають схожі спектральні властивості матеріалів, з яких вони виготовлені. Особливо ця проблема актуальна для густо забудованих місцевостей. Для ідентифікації будинків та доріг застосовуються геометричні властивості та контекстна інформація про розташування поблизу об'єктів інших класів. Класифікацію було виконано у декілька етапів, таку схему було обрано для того, щоб при ідентифікації будинків та доріг можливо було врахувати наявність тіней та рослинності по сусідству.

Для класифікації супутникових знімків було використано систему нечіткого логічного виведення. Системи нечіткого виведення застосовувалися для класифікації супутникових знімків, отриманих супутниками GeoEye-1, QuickBird [50], Landsat-8 [48], IKONOS [54].

На практиці, об'єкти зображення мають властивості, притаманні не тільки їхньому класу. Система нечіткого виведення дає можливість класифікації об'єктів зображення, коли прийняття рішення щодо класу неможливе лише за пороговим значенням одної з властивостей. Операції нечіткої логіки, що застосовуються у системах нечіткого виведення,

дозволяють замінити чіткі значення властивостей об'єктів зображення на лінгвістичні змінні, що описуються нечіткими функціями належності. Лінгвістичною змінною зветься змінна, що приймає значення з множини слів чи словосполучень деякої природньої чи штучної мови [80]. Множина можливих значень змінної зветься терм-множиною.

У традиційних методах класифікації кожен піксель чи сегмент присвоюється до одного з класів, належність до класу можна описати атрибутом, який приймає значення 0 чи 1. У системах нечіткого логічного виведення належність сегмента до класу визначається функцією належності. Функція належності приймає значення з діапазону $[0, 1]$. Якщо функція приймає значення 1, сегмент з максимальною ймовірністю належить до класу і навпаки, якщо функція приймає значення 0.

Нечіткий логічний вивід – це апроксимація залежності «вхід-вихід» $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ на основі нечіткої бази знань та операцій над нечіткими множинами [80].

Задача класифікації полягає у відображенні типу:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}, \quad (2.20)$$

де $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор інформативних властивостей, $\{d_1, d_2, \dots, d_m\}$ – наперед задані класи.

Типова структура системи нечіткого логічного виведення показана на рис. 2.6. Вона містить наступні складові:

- *фазифікатор* – трансформує фіксований вхідний вектор X у вектор нечітких множин \tilde{X} , необхідних для нечіткого виведення;
- *нечітка база знань* – містить інформацію про залежність $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ у вигляді лінгвістичних правил;
- *функції належності* – використовуються для представлення лінгвістичних термів у вигляді нечітких множин;

- машина нечіткого логічного виведення – на основі правил бази знань визначає значення змінної виходу y у вигляді нечіткої множини \tilde{Y} ;
- дефазифікатор – перетворює вихідну нечітку множину \tilde{Y} у чітке число Y .



Рисунок 2.6 – Схематичне зображення системи нечіткого логічного виведення

У роботі було застосовано систему нечіткого логічного виведення типу Мамдані. Класифікація на основі нечіткого логічного виведення виконується по нечіткій базі знань:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left[\bigcap_{i=1}^n (x_i = a_{i,jp}) \right] \rightarrow y = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad i = \overline{1, n} \quad (2.21)$$

де k_j – кількість рядків кон'юнкції, у яких вихід оцінюється нечітким термом

$d_j, j = \overline{1, m}$; $a_{i,jp}$ – нечіткий терм, яким оцінюється змінна x_i у рядку jp ,

$p = \overline{1, k_j}$; m – кількість термів для лінгвістичної оцінки виходу.

Ступені належності об'єкта класифікації, чії властивості задані вектором $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, класам d_j , знаходяться наступним чином:

$$\mu_{d_j}(X) = \bigcup_{p=1, k_j} \bigcap_{i=1, n} [\mu_{jp}(x_i)], \quad (2.22)$$

де $\bigcup(\bigcap)$ – операція з s-норми (t-норми), тобто з множини реалізацій логічної операції АБО (ТА). У роботі використано наступні реалізації: для операції АБО – пошук максимуму, для операції ТА – пошук мінімуму.

$\mu_{jp}(x_i)$ – функція належності вхідної змінної x_i нечіткому терму $a_{i,jp}$:

$$a_{i,jp} = \int_{\underline{x_i}}^{\overline{x_i}} \mu_{jp}(x_i) / x_i, \quad x_i \in \left[\underline{x_i}, \overline{x_i} \right], \quad (2.23)$$

$\mu_{d_j}(y)$ – функція належності виходу y нечіткому терму d_j :

$$d_j = \int_{\underline{y}}^{\overline{y}} \mu_{d_j}(y) / y, \quad y \in \left[\underline{y}, \overline{y} \right]. \quad (2.24)$$

У якості рішення обирається клас з максимальним ступенем належності:

$$y^* = \max(\mu_{d_1}(X^*), \mu_{d_2}(X^*), \dots, \mu_{d_m}(X^*)). \quad (2.25)$$

На першому етапі класифікації знайдено рослинність, водойми та тіні. Ці типи об'єктів можуть бути з високою точністю ідентифіковані за спектральною інформацією. На цьому етапі побудовано систему нечіткого логічного виведення з чотирма вхідними змінними та одним виходом (рис. 2.7).

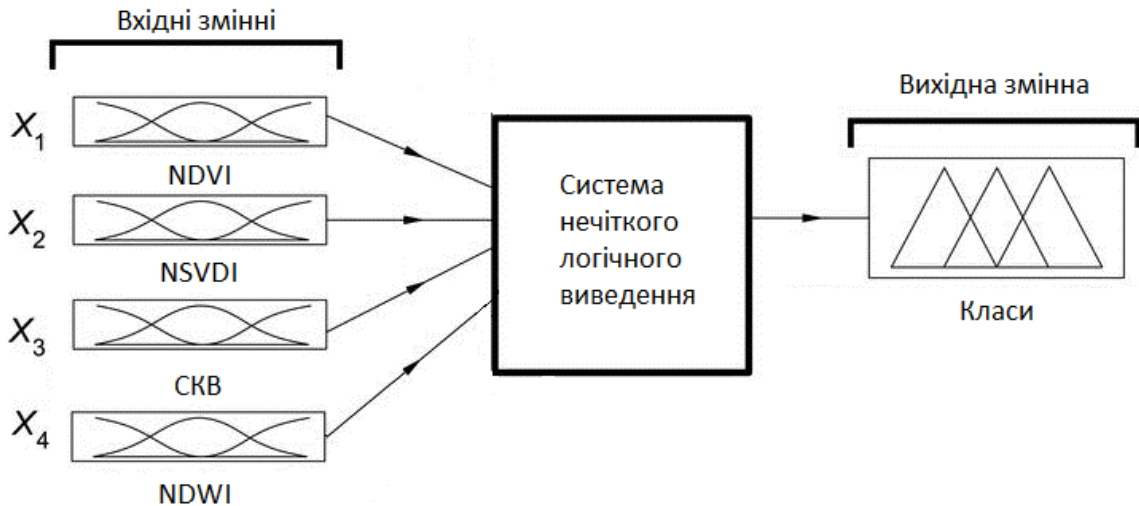


Рисунок 2.7 – Система нечіткого логічного виведення для першого етапу класифікації

На кожному з трьох етапів на вхід системи нечіткого логічного виведення по чергово подаються вектори ознак кожного сегментів. На першому етапі класифікацій 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 може приймати значення з терм-множини: $d = \{\text{некласифіковані, тінь, дерева, трава, вода}\}$.

При моделюванні систем нечіткого логічного виведення було використано трикутні та трапецієвидні функції належності (рис. 2.8). Вибір функції такого типу обумовлен легкістю розрахунку їх параметрів. Такі функції належності часто використовуються для задач класифікації іншими авторами.

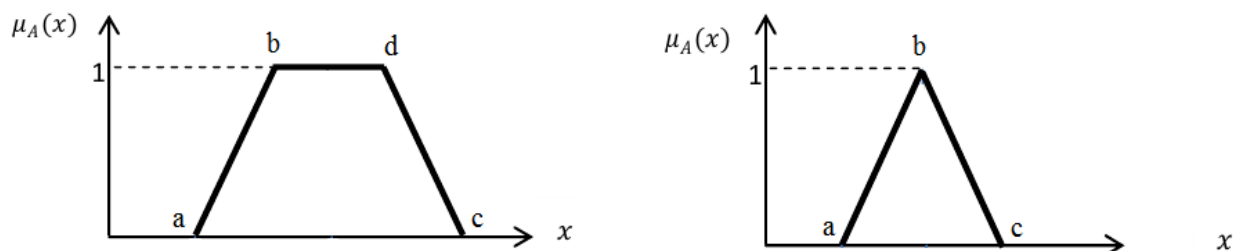


Рисунок 2.8 – Графіки трапецієвидної та трикутної функцій належності

Ці функції описуються наступними виразами, трикутна:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq c \leq x, \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.26)$$

трапецієвидна:

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq c \leq x. \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2.27)$$

Вхідні лінгвістичні змінні приймають значення з терм-множини: $\{\text{низьке, середнє, високе}\}$. В системах нечіткого виведення, лінгвістичні змінні замінюють чіткі порогові значення. Наприклад, для змінної x_1 чіткі діапазони значень індексу NDVI замінені на функції належності до термів з терм-множини. Функції належності побудовано, базуючись на фізичних характеристиках значень індексу NDVI, який змінюється від -1 до 1. Густій рослинності відповідають значення NDVI від 0,7 до 1 та терм “*високе*”, розрідженій рослинності – значення від 0,5 до 0,7 та терм “*середнє*”, нижче за 0,5 – “*низьке*”.

На рисунку 2.9 показано фрагмент зображення, сегментований за допомогою методу багатомасштабної сегментації, та результати першого етапу класифікації. Після застосування розробленої системи нечіткого логічного виведення до сегментованого зображення (рис 2.9, а) знайдено сегменти, що відповідають наступним класам: рослинність, водойми, тіні (рис 2.9, б).

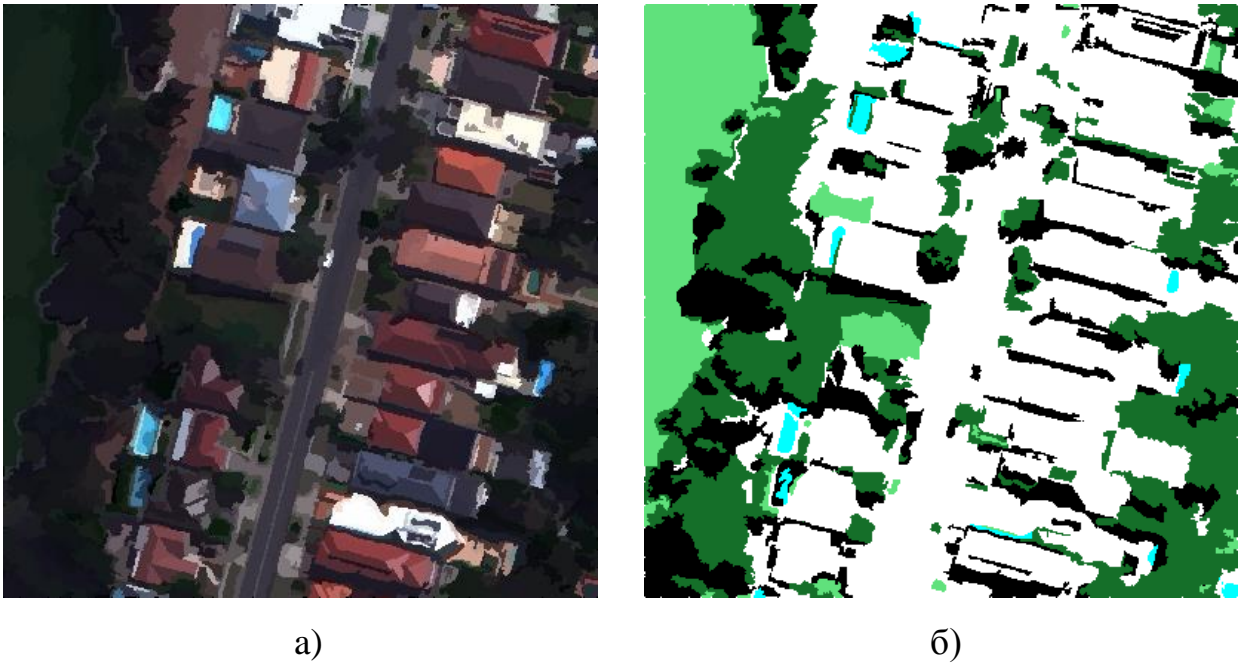


Рисунок 2.9 – Сегментоване зображення фрагмента супутникового знімка (а); результат першого етапу класифікації (б)

Для позначення класів сегментів використані кольори та нумерація, представлені на рис. 2.10.









1. 	Будівлі	5. 	Дерева
2. 	Дороги	6. 	Ґрунт
3. 	Тінь	7. 	Вода
4. 	Трава	8. 	Не класифіковано

Рисунок 2.10 – Кольори для позначення результатів 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.

Вхідні лінгвістичні змінні приймають значення з терм-множини: $\{\text{низьке, середнє, високе}\}$. Нечітка терм-множина вихідної змінної може приймати значення $d = \{\text{некласифіковані, будівлі, дороги, ґрунт}\}$. При побудові

нечітких лінгвістичних змінних також використані трапецієвидні та трикутні функції належності (рис. 2.8). Параметри функції належності присвоювалися згідно особливостями обраних властивостей. Система нечіткого логічного виведення для другого етапу класифікації представлена на рисунку 2.11. Результат другого етапу класифікації показано на рисунку 2.12, а).

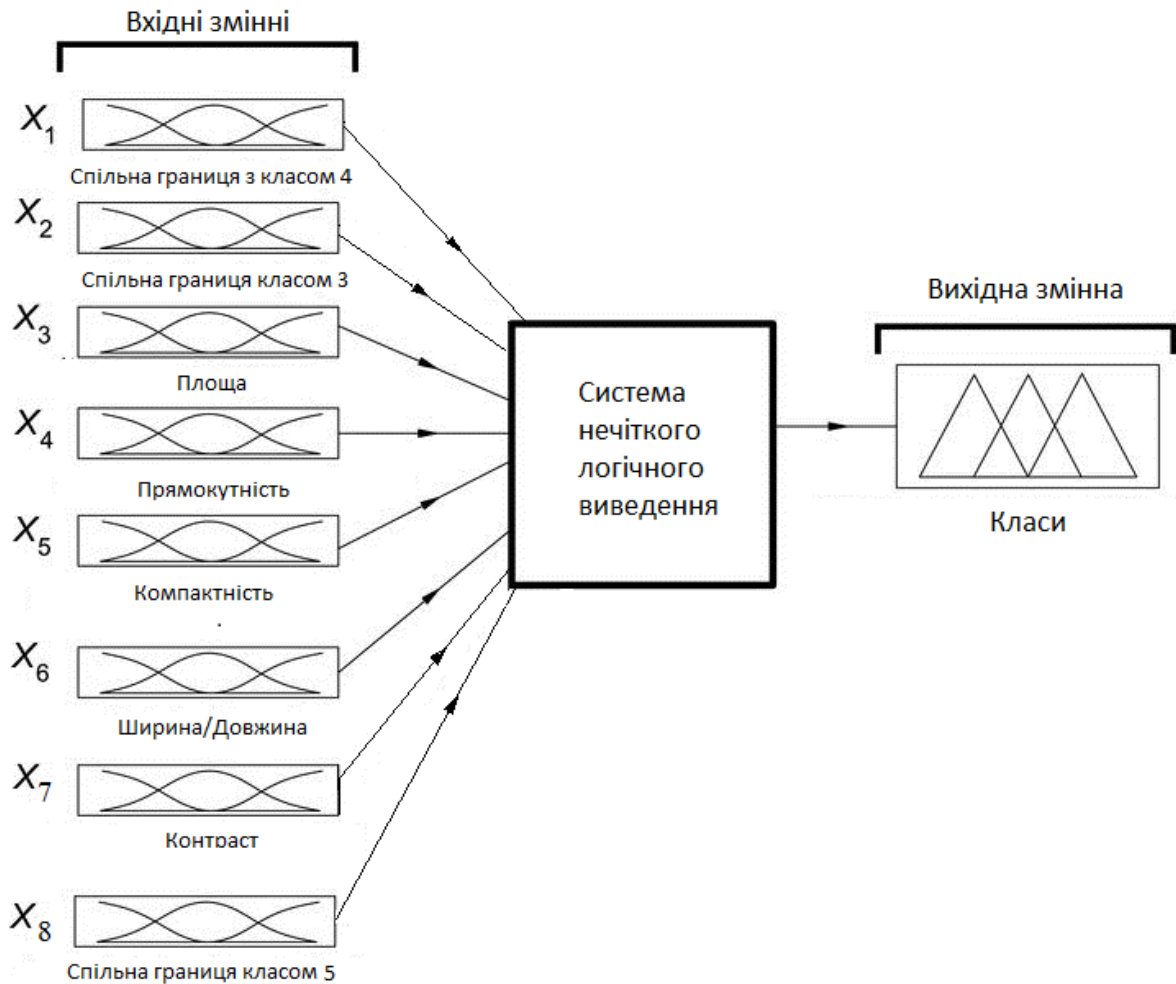


Рисунок 2.11 – Система нечіткого логічного виведення для другого етапу класифікації

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 приймають значення з терм-множини: $\{низьке, середнє, високе\}$. Нечітка терм-множина вихідної змінної може приймати значення $d=\{будівлі, дороги, тіні, трава, дерева ґрунт, вода\}$. Параметри функції належності присвоювалися згідно з особливостями обраних властивостей. Система нечіткого логічного виведення для третього етапу класифікації представлена на рисунку 2.13. Результат другого етапу класифікації показано на рисунку 2.12 б).

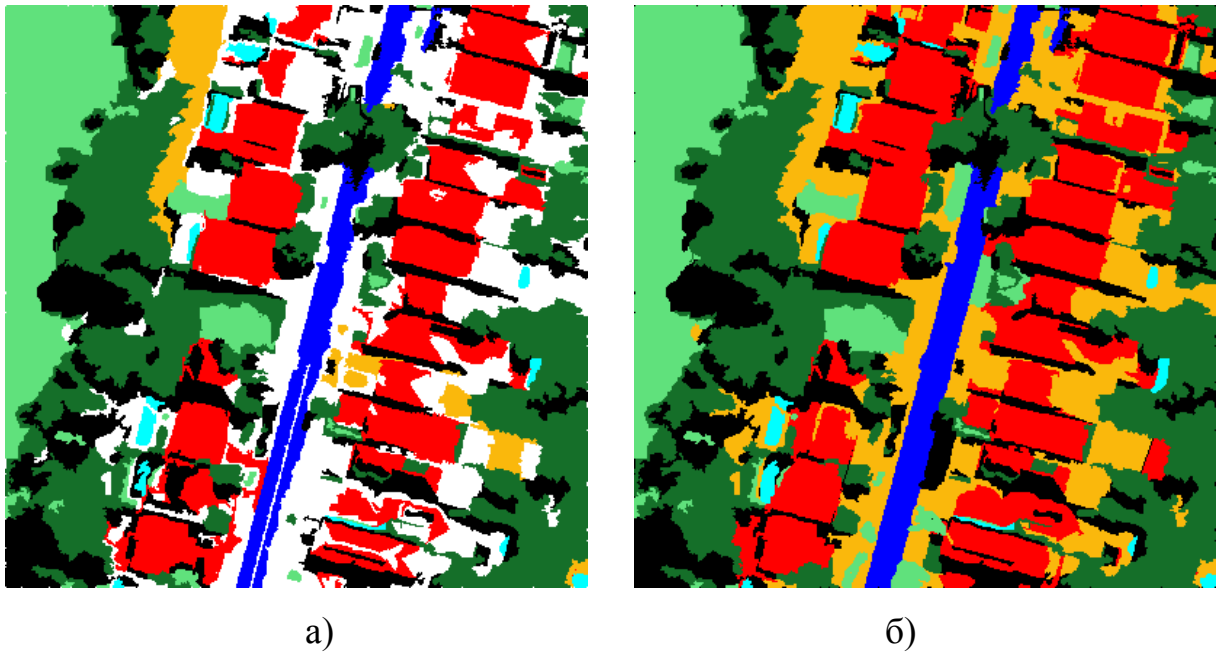


Рисунок 2.12 – Результат другого (а) та третього (б) етапів класифікації

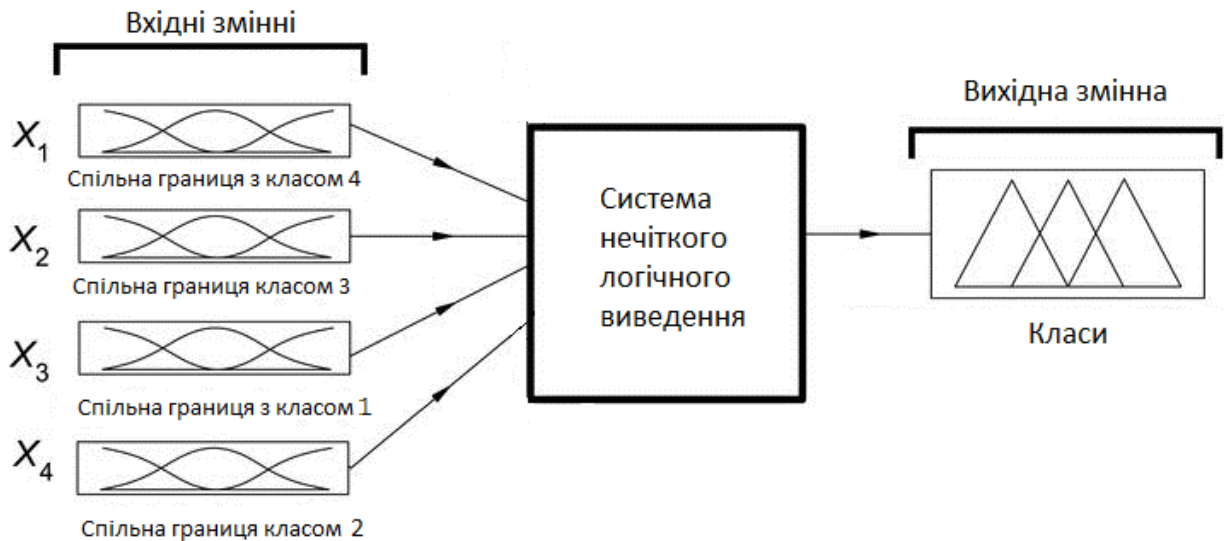


Рисунок 2.13 – Система нечіткого логічного виведення для третього етапу класифікації

2.7 Оцінка результатів класифікації

Необхідно оцінити точність класифікації, визначити наскільки точно класи об'єктів на знімку відповідають реальним класам об'єктів на земній поверхні. Для цього класифіковане зображення порівнюється з заздалегідь правильною картою класів. Карта класів зветься "еталонним" зображенням та найчастіше отримується шляхом ручної розмітки.

Було застосовано статистичні показники для оцінки точності класифікації. За результатами класифікації складається *матриця похибок* – таблиця, яка показує похибку класифікації для кожного класу [81, 82]. Матриця похибок складається з n строк та n стовбців, де n – кількість класів об'єктів на еталонному зображенні. Строки матриці відповідають класам на еталонній карті, стовбці – класам на оброблюваному зображенні. Позначимо як n_{ij} пікселі, що належать класу j , але були класифіковані за допомогою розробленої технології як клас i , $n_{i(row)} = \sum_j n_{ij}$ – число пікселів, що були класифіковані як клас i розробленою технологією, $n_{j(col)} = \sum_i n_{ij}$ – число

пікселів, що належать до класу j згідно з еталонною картою. Діагональні елементи матриці – пікселі, що класифіковані вірно.

Для оцінки результатів класифікації було використано загальну точність O^c , яка показує відсоток правильно класифікованих пікселів, та Каппа-індекс – K . Каппа-індекс узгодженості для двох варіантів класифікації N пікселів до k взаємовиключних класів був запропонований Кохеном у [83].

$$O^c = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^k n_{ii}, \quad (2.28)$$

де N – кількість пікселів, k – кількість класів.

$$K = \frac{O^c - p_e}{1 - p_e}, \quad (2.29)$$

де

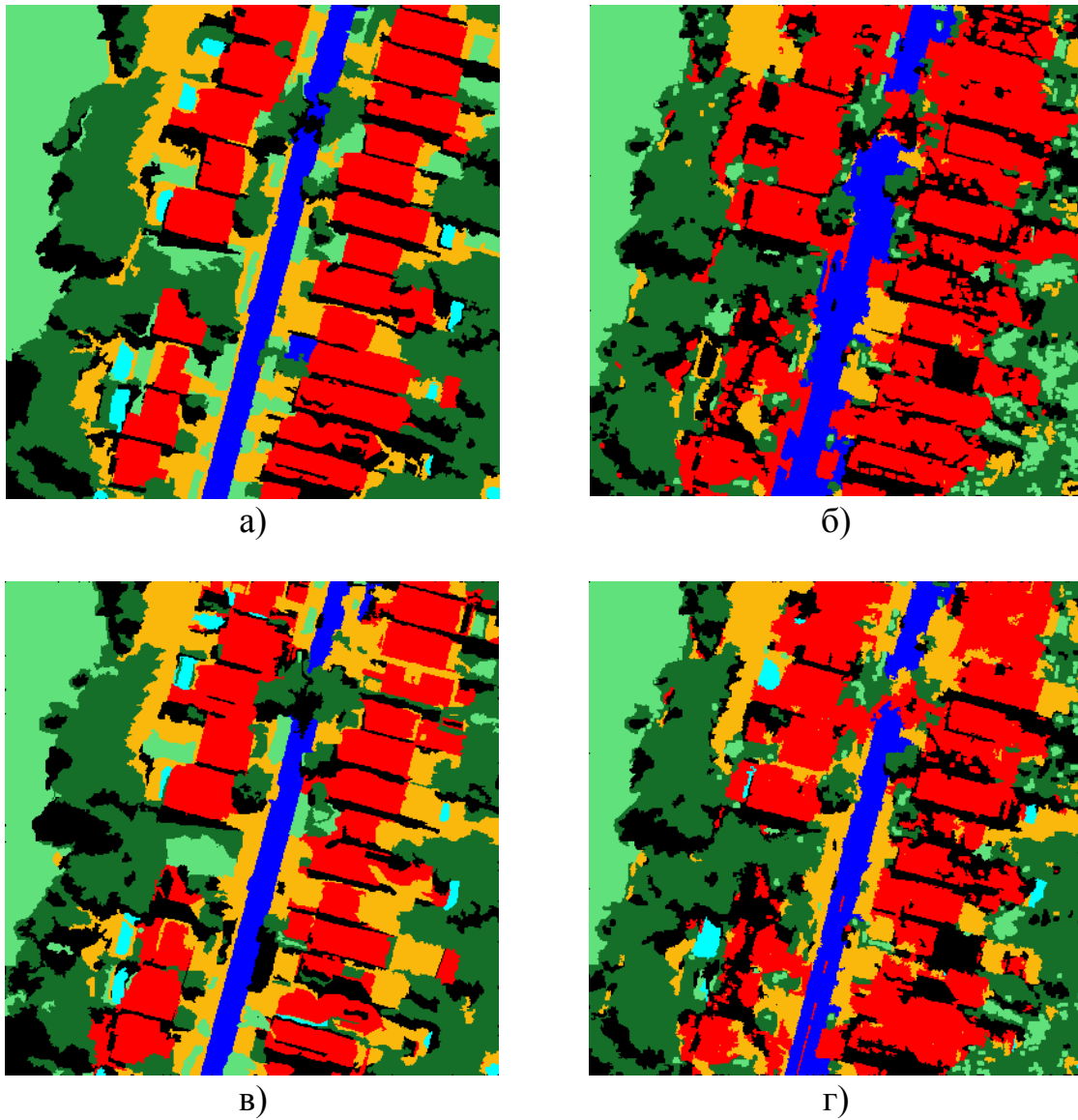
$$p_e = \frac{1}{N^2} \sum_i n_{i(col)} n_{i(row)}. \quad (2.30)$$

Загальна точність O^c та Каппа-індекс приймають значення від 1 до 0. Чим вище їх значення, тим кращий результат класифікації. При використанні загальної точності, на результат оцінки впливає те, наскільки часто певний клас зустрічається на тестовому зразку знімка. Це актуально при аналізі супутникових знімків, на яких один клас може займати велику площу. Наприклад, якщо клас А займає 90 % площі знімка, а клас В – 10 %, то випадково обрана множина пікселів з 90 % ймовірністю буде належати класу А. Тоді сумісна ймовірність того, що ці пікселі будуть правильно віднесені до класу А випадково дорівнює 0,81. Так само, сумісна ймовірність

правильного віднесення пікселів до класу В випадковим чином становить 0,01. В результаті, навіть при випадковому присвоєнні карті пікселів еталонного зображення, загальна точність карти буде близько 82 %. Тобто, карти, на яких присутні декілька класів, що займають великі площі, можуть мати більшу загальну точність, ніж карти з багатьма класами приблизно одної площі. Каппа-індекс більш показовий у таких випадках.

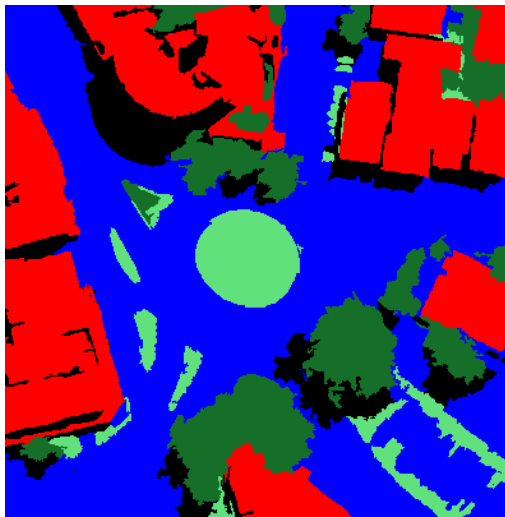
На рисунках 2.14, 2.15, 2.16 показано результати класифікації трьох фрагментів супутникових знімків розробленим методом, з використанням на етапі сегментації трьох різних методів. Також показані еталонні зображення відповідних фрагментів.

У таблиці 2.4 показані розраховані значення O^c та K . Найкращі результати було отримано при використанні на етапі сегментації методу “Multiresolution” при значеннях параметру $h=[40..60]$. При використанні методу “Mean-shift” результати були гірші. Це обумовлено тим, що при використанні методу “Mean-shift” зі значеннями параметрів $r1=[10..20]$ та $r2=[40..70]$ відбувається злиття в один сегмент пікселів, які фактично належать до різних класів. Зменшення параметрів приводить до збільшення кількості сегментів малого розміру, що значно ускладнює подальший процес обробки. Як видно з таблиці 2.3, при сегментації зображення методом “K-means” утворюється велика кількість малих сегментів, чия кількість, в результаті процедури усунення малих сегментів, зменшується приблизно в 15 раз. Результати сегментації методом “K-means” майже не змінюються при зміні кількості ітерації, тому максимальна кількість застосованих ітерацій дорівнювала 10. Не дивлячись на велику кількість отриманих сегментів, результати класифікації з використанням методу “K-means” були добрі, отже цей метод може бути застосований для сегментації фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості з метою подальшого аналізу властивостей сегментів та класифікації.

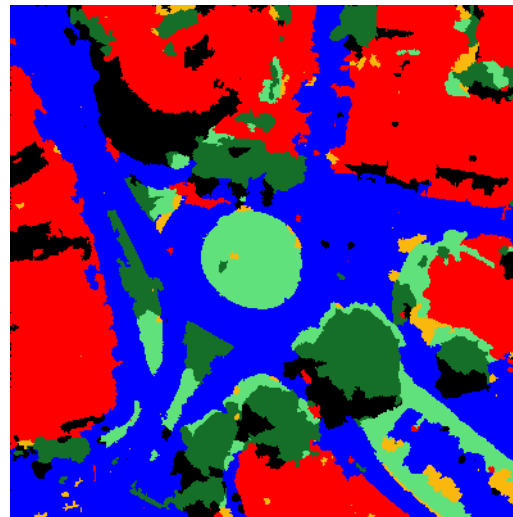


а) еталонне зображення фрагмента супутникового знімка №3; б) результат класифікації, після сегментації методом “Mean-shift”; в) результат класифікації після сегментації методом “Multiresolution”; г) результат класифікації після сегментації методом “K-means”

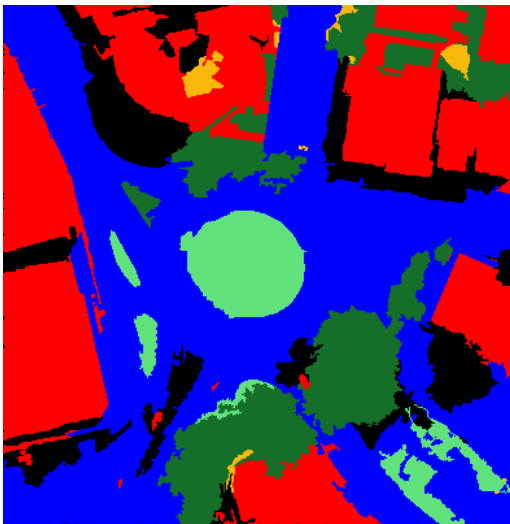
Рисунок 2.14 – Результат класифікації супутникового знімка № 3



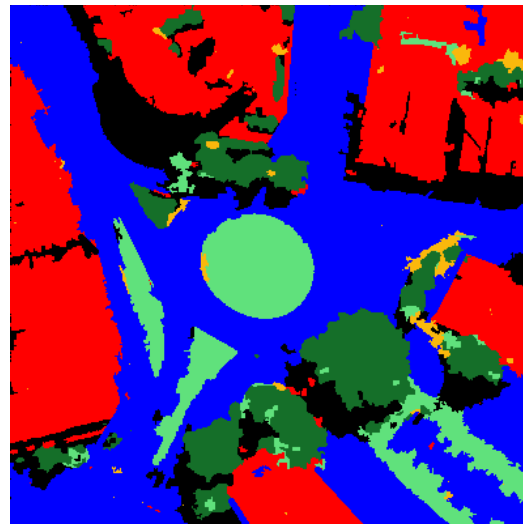
а)



б)



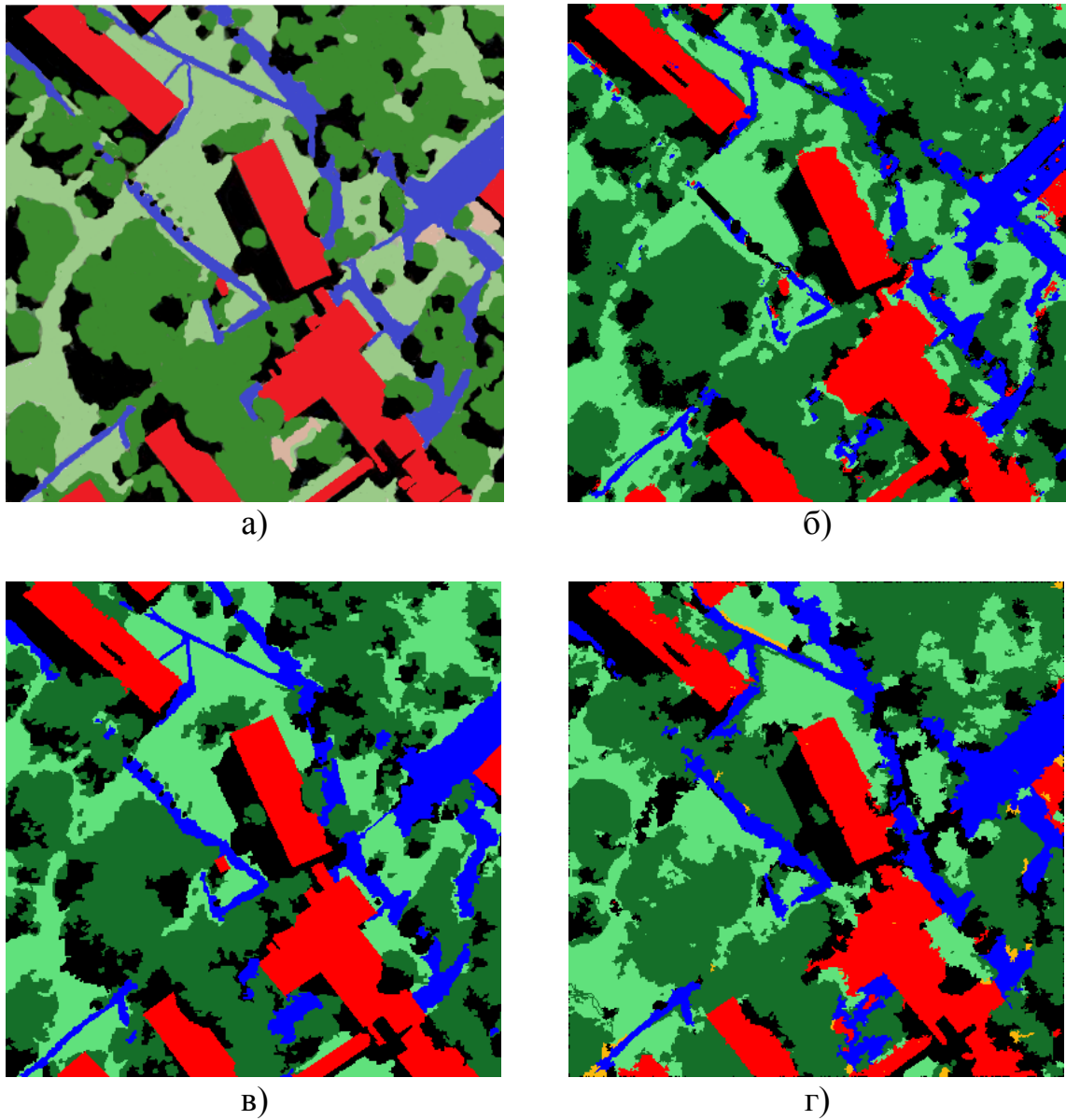
в)



г)

а) еталонне зображення фрагмента супутникового знімка №2; б) результат класифікації після сегментації методом “Mean-shift”; в) результат класифікації після сегментації методом “Multiresolution”; г) результат класифікації після сегментації методом “K-means”

Рисунок 2.15 – Результат класифікації супутникового знімка № 2



а) еталонне зображення фрагмента супутникового знімка №1; б) результат класифікації після сегментації методом “Mean-shift”; в) результат класифікації після сегментації методом “Multiresolution”; г) результат класифікації після сегментації методом “K-means”

Рисунок 2.16 – Результат класифікації супутникового знімка № 1

Таблиця 2.4 – Оцінки точності класифікації

	Multiresolution	Mean-shift	K-means
Знімок 1			
K	0,83	0,7	0,85
O^c	0,87	0,8	0,96
Знімок 2			
K	0,91	0,76	0,84
O^c	0,98	0,85	0,92
Знімок 3			
K	0,9	0,76	0,85
O^c	0,94	0,69	0,8

2.8 Висновки до розділу

У розділі розглянуто задачі, пов'язані з дешифруванням багатоканальних фотограмметричних зображень. Розроблено технологію дешифрування супутникових знімків високої просторової розрізненості, основу на об'єктно-орієнтованому підході, яка дозволяє отримати класифіковане зображення земної поверхні та ідентифікувати об'єкти певних класів. Для досягнення поставленої у роботі мети були наступні задачі:

1. Досліджено ефективність методів сегментації цифрових зображень “Mean-shift”, “K-means” та “Multiresolution”. За допомогою цих методів оброблено декілька фрагментів зображень, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3.

2. Результати сегментації покращено за допомогою процедури злиття сегментів малого розміру з сусідніми сегментами. Це допомогло зменшити кількість отриманих сегментів та зробити результат сегментації більш

зручним для подальшого аналізу. У таблицях 2.1, 2.2 та 2.3 показано кількість сегментів зображення до застосування процедури злиття сегментів та після. Доведено, що методи “Mean-shift” та “K-means” призводять до надмірної сегментації. Кількість сегментів, отриманих методом “Multiresolution”, зменшилась не суттєво (в середньому на 20 % від початкової кількості) у порівнянні з кількістю сегментів до процедури злиття. Це обумовлено тим, що розмір сегментів у методі “Multiresolution” регулюється параметром масштабу h .

3. Для класифікації зображень розраховано геометричні, статистичні, текстурні, спектральні та просторові властивості сегментів зображення. Вони можуть бути використані для ідентифікації об’єктів, що належать до окремих класів, та для класифікації всього зображення.

4. Для класифікації супутникових знімків розроблено систему нечіткого логічного виведення, яка на основі розрахованих властивостей сегментів зображення відносила їх до одного з класів. Перевагою розробленого методу є багатоетапна структура системи прийняття рішень щодо класу сегментів. У результаті класифікації на оброблюваних фрагментах супутникових знімків були ідентифіковані наступні класи: будівлі, дороги, дерева, трава, ґрунт, вода, тіні.

6. Для оцінки результатів роботи розробленого методу, для класифікованих зображень розраховано загальну точність O^c та Каппа-індекс. Найкращі результати отримано при використанні на етапі сегментації методу “Multiresolution” при значеннях параметру $h=[40..60]$, тому цей метод доцільно застосовувати при дешифруванні супутникових зображень високої просторової розрізненості. Метод показав достатньо високу точність і може бути використаний для практичного застосування.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора: [2, 3, 4, 5].

РОЗДІЛ 3 ІДЕНТИФІКАЦІЯ ТА КОМПЕНСАЦІЯ ТІНЕЙ НА СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ

3.1 Технологія ідентифікації та компенсації тіней

Тіні можуть бути корисною дешифрувальною ознакою при аналізі ДДЗ, але, також, присутність тіней може спричиняти труднощі при обробці даних [1]. За допомогою тіні можна визначити форму, висоту [84], локацію об'єктів на знімках. Тіні використовують при аналізі змін земної поверхні за знінками, отриманими у різний час [85]. В деяких випадках присутність тіней ускладнює дешифрування ДДЗ [86, 87]. Наприклад, тіні можуть спричиняти невірну роботу алгоритмів класифікації, викривлення кольору та текстур. Проблема присутності тіней особливо актуальна для супутникових знімків. При аерозйомці присутність тіні може бути скорочена завдяки вибору часу знімання. Для супутників, що обертаються по сонячно-синхронній орбіті, зйомку певної місцевості можливо вести тільки в визначений час. Зазвичай знімання проводиться у ранкові часи, коли атмосфера більш прозора. У цей час висота Сонця на небі дуже низька, через що тіньові ділянки на знімку особливо великі.

Задача компенсації тіні полягає в отриманні знімка, на якому тіні відсутні, тобто освітленість тіньових ділянок має бути такою ж, як освітленість решти зображення. Для цього необхідно виконати обробку тіньових ділянок зображення. Для отримання зображення, на якому тіньові ділянки будуть мати таку ж саму освітленість, як решта зображення, необхідно вирішити три підзадачі: ідентифікація тіні, компенсація тіні, обробка границь тіньових ділянок [8]. Схема розробленої технології, представлена на рис. 3.1. Для ідентифікації тіні застосовується порогова бінаризація індексу, розрахованого по вхідному супутниковому зображенню. У роботах різних авторів для ідентифікації тіні також використовуються текстурні властивості зображень [88]. Для компенсації тіні використовуються

метод, який враховує фізичні принципи формування тіні. Технологія також передбачає обробку границь тіньових ділянок, до яких застосовувався метод компенсації.

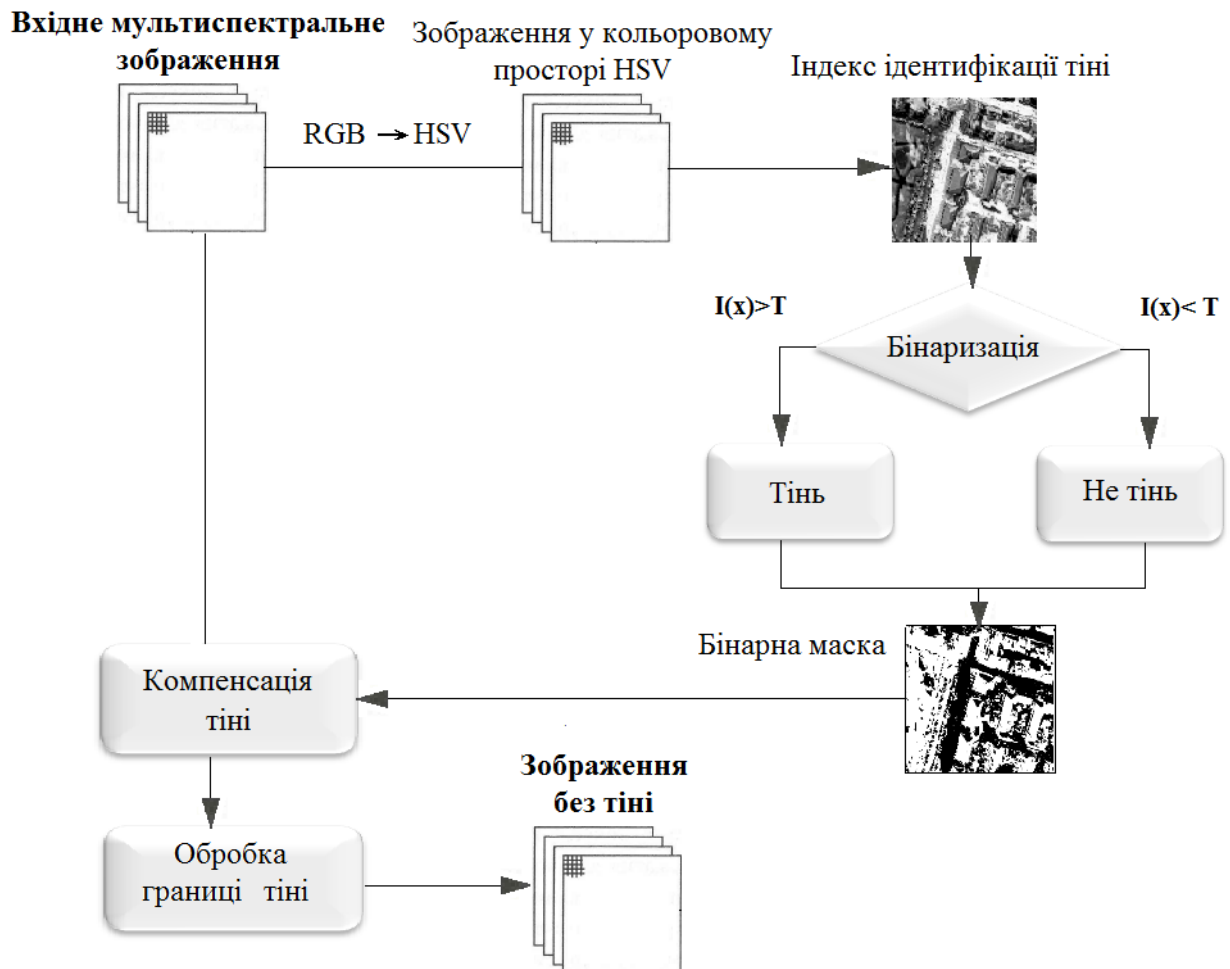


Рисунок 3.1 – Схема розробленої технології компенсації тіні

3.2 Властивості тіні

Тіні на знімках виникають, коли ділянка зображення повністю або частково загорожена від джерела світлового випромінювання [89]. Тіньові ділянки зображення та об'єкти, що знаходяться у них, освітлені розсіюваним випромінюванням, що відбилося від інших об'єктів зображення.

На знімках можливо виділити два типи тіней (рис. 3.2): власна тінь та падаюча тінь [89, 90, 91]. Власна тінь утворюється коли об'єкт, що

перегороджує світло, не освітлений з одного боку. Падаюча тінь утворюється на поверхні чи об'єктах, коли вони закриті від випромінювання іншим об'єктом. Ці типи тіней мають різну яскравість, вона залежить від віддзеркалюючих характеристик поверхонь та від кількості розсіяного світла, що на надходить на об'єкти у тіньових ділянках. Власна тінь, зазвичай, має вищу яскравість, ніж падаюча тінь.

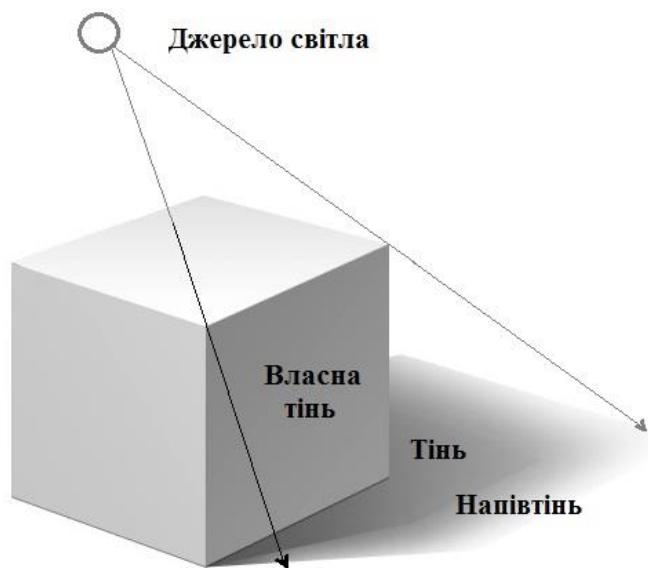


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення різних типів тіней

Падаюча тінь також може бути поділена на тінь та напівтінь. Частина падаючої тіні, яка повністю закрыта від прямих променів світла, зветься тінню. Напівтінь закрыта від прямих променів частково та, зазвичай, знаходиться ближче до краю падаючої тіні.

Тіньові ділянки на супутникових зображеннях мають наступні характеристики [91]:

- пікселі у тіньових ділянках зображення темніші за пікселі у нетіньових ділянках;
- значення RGB тіньових пікселів нижче, ніж відповідні значення нетіньових пікселів;

- текстурні властивості нетіньових ділянок зображення подібні до текстурних властивостей відповідних їм тіньових ділянок, але, як правило, мають нижчі значення;
- тіньові ділянки зображення освітлені розсіяним випроміненням, у той час як нетіньові ділянки освітлені розсіяним і прямим випромінюванням;
- компонента кольору у інваріантних кольорових просторах HSI та HSV, яка відображує колір поверхні, має приблизно рівні значення як у тіньових, так і у освітлених ділянках зображення;
- компонента яскравості у інваріантних кольорових просторах HSI та HSV значно менша у тіньових ділянках.

3.3 Ідентифікація тіні

3.3.1 Методи ідентифікації тіні

В залежності від типу знімків для ідентифікації тіні застосовуються різні методи [57, 90]. Задача ідентифікації полягає в знаходженні ділянок зображення, що відповідають тіні. Найчастіше для ідентифікації тіні застосовувалися порогові методи поділу пікселів зображення на тіньові і фонові [92, 93]. У якості ознак, за якими відбувається порогове розбиття, використовуються яскравість зображення у різних каналах та компоненти зображення у інваріантних кольорових просторах. Канали зображення, що відповідають червоному, зеленому та синьому (RGB) можуть бути трансформовані у такі кольорові простори, як HSV (Hue Saturation Value), HSI (Hue Saturation Intensity), YIQ (luma, inphase, quadrature) або YCbCr [94, 95, 96]. Також використовуються спектральні індекси, за якими можливо ідентифікувати тінь. Пікселі у тіньових ділянках мають вищі значення індексів, ніж у нетіньових ділянках. Тіні знаходяться шляхом розбиття

значень розрахованого індексу за пороговим значенням. Для знаходження оптимального порогу розбиття використовуються автоматичні методи.

Для того, щоб визначити, який метод ідентифікації найкраще підходить для застосування до багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості досліджено різні методи ідентифікації тіні [1]. Після ідентифікації тіні цими методами на знімках, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3, було оцінено точність їх роботи. Фрагмент оброблюваного знімка показано на рис. 3.3.

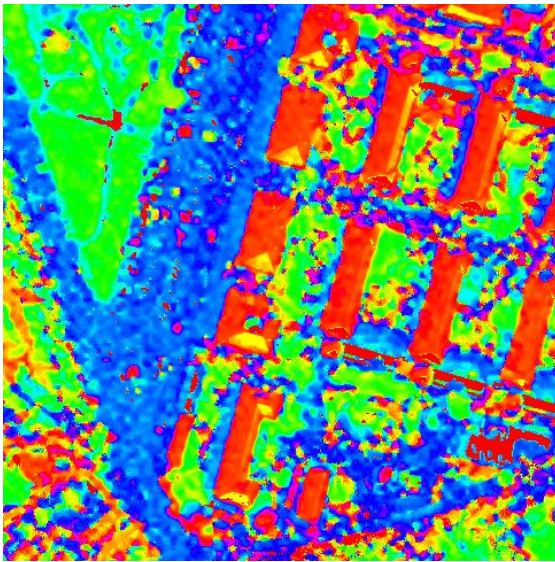


Рисунок 3.3 – Фрагмент супутникового знімка

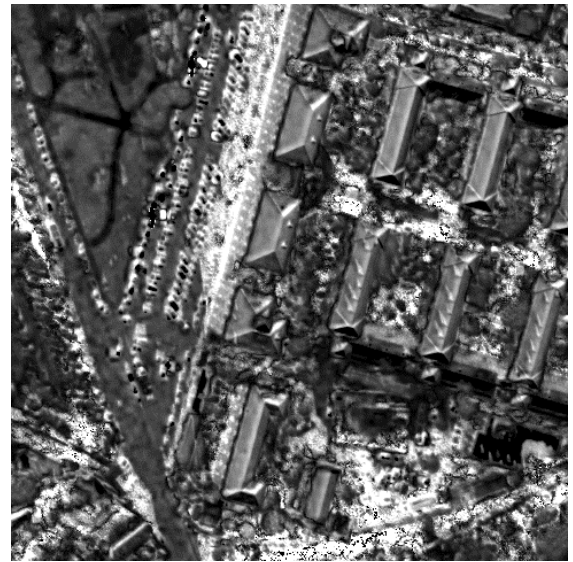
У роботах [92, 93, 97] для ідентифікації тіні застосовувався індекс NSVDI (normalized saturation-intensity difference index).

$$\text{NSVDI} = \frac{S - V}{S + V}, \quad (2.23)$$

де S та V – компоненти зображення у кольоровому просторі HSV (рис. 3.4), для розрахунку компонент використовувалися наступні перетворення:



а)



б)



в)

а) колір (H); б) насиченість (S); в) яскравість (V)

Рисунок 3.4 – Компоненти зображення у кольоровому просторі HSV

$$R' = \frac{R}{255}, G' = \frac{G}{255}, B' = \frac{B}{255}, S = \begin{cases} 0, & \text{MAX} = 0 \\ 1 - \frac{\text{MIN}}{\text{MAX}}, & \text{MAX} \neq 0 \end{cases}, V = \text{MAX}, \quad (2.24)$$

$$H = \begin{cases} 0, \text{MAX} = \text{MIN} \\ 60 \left(\frac{G' - B'}{\text{MAX} - \text{MIN}} \bmod 6 \right), \text{MAX} = R' \\ 60 \left(\frac{B' - R'}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 2 \right), \text{MAX} = G' \\ 60 \left(\frac{R' - G'}{\text{MAX} - \text{MIN}} + 4 \right), \text{MAX} = B' \end{cases}, \quad (3.3)$$

$$\text{MAX} = \text{MAX}(R', G', B'), \quad \text{MIN} = \text{MIN}(R', G', B').$$

На рисунку 3.5 показано напівтонове зображення індексу NSVDI. Для візуалізації індексу діапазон його значень приведено з $[-1, 1]$ до $[0, 255]$.



Рисунок 3.5 – Спектральний індекс NSVDI

У [95] для ідентифікації тіні було застосовано спектральне відношення виду:

$$r(x) = \frac{H+1}{I+1}, \quad (2.25)$$

де H та I – компоненти зображення у кольоровому просторі HSI. Для розрахунку компонент використовувалися наступні перетворення:

$$\begin{bmatrix} I \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ -\frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{6} & \frac{\sqrt{6}}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad S = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}, \quad H = \text{tg}^{-1}\left(\frac{V_2}{V_1}\right). \quad (2.26)$$

Спектральне відношення $r(x)$ було виведено з врахуванням наступних фізичних характеристик тіней:

- 1) тінь має меншу яскравість;
- 2) через Релеєвське розсіювання світла у тіні присутня велика кількість синіх та фіолетових хвиль [98];
- 3) збільшення компоненти кольору у тіні через зміну довжини хвиль, при зміні яскравості у тіньових ділянках знімка відносно нетіньових [99].

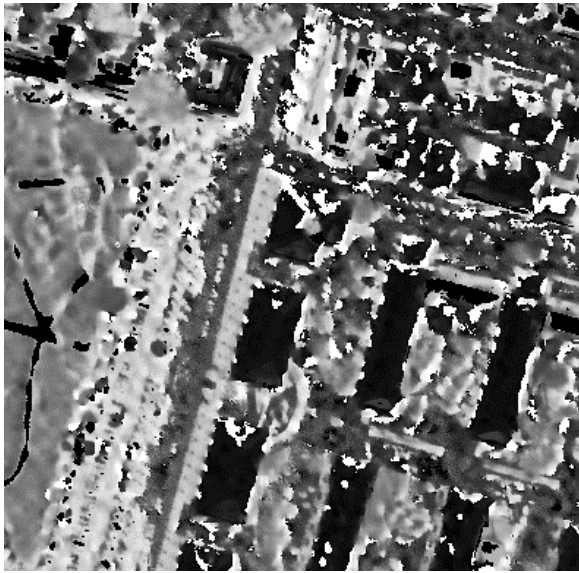
Компоненти зображення у кольоровому просторі HSI та розраховані по ним відношення $r(x)$ та $r_2(x)$ показані на рисунках 3.6 – 3.8.

У роботі [100] для ідентифікації тіні використовувалось відношення виду:

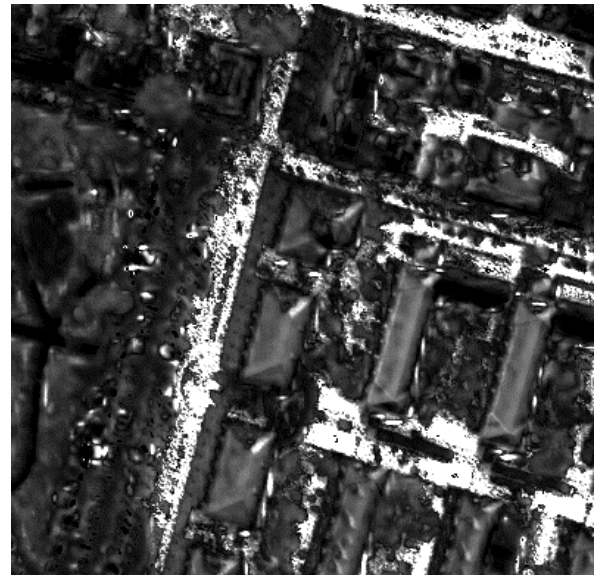
$$r_2(x) = \frac{H(x)}{I(x) + 0,01}, \quad (2.27)$$

де $H(x)$ та $I(x)$ – компоненти зображення у кольоровому просторі HSI, $r_2(x) \in [0,255]$. Це відношення є модифікацією відношення, використаного у роботі [95].

Канали зображення у кольоровому просторі RGB показано на рис. 3.9.



а)



б)



в)

а) колір (H); б) насиченість (S); в) яскравість (I)

Рисунок 3.6 – Компоненти зображення у кольоровому просторі HSI



Рисунок 3.7 – Спектральне відношення $r(x)$



Рисунок 3.8 – Спектральне відношення $r_2(x)$



а)



б)



в)

Рисунок 3.9 – Канали зображення 7 (а), 8(б) та 2(в)

Застосування спектральної інформації з різних каналів супутникових знімків розглядається у роботах [101, 102]. У [103] запропоновано спектральний індекс SDI (рис. 3.10), який можливо застосувати до каналів супутників WordView-2 та WordView-3.

$$SDI = \frac{Band8 - Band2}{Band8 + Band2} - Band7, \quad (2.28)$$

де *Band8*, *Band2*, та *Band7* – відповідно восьмий, другий, та сьомий канали знімків.



Рисунок 3.10 – Спектральний індекс SDI

У роботі [104] було запропоновано відношення SDI_2 (рис. 3.11):

$$SDI_2 = \frac{2 - PC_1}{(G - B) \cdot R + 1}, \quad (2.29)$$

де R , G та B – нормалізовані значення у червоному, зеленому та синьому каналах. PC_1 – нормалізовані значення першої головної компоненти.



Рисунок 3.11 – Спектральний індекс SDI_2

Перетворення на головні компоненти – це лінійне перетворення, яке застосовується до багатовимірних зображень з метою аналізу їх статистичних характеристик. Більша частка інформації міститься у першій головній компоненті, тому для тіней вона має нижчі значення, ніж для решти зображення. Таким чином чисельник відношення має вищі значення для тіні. Знаменник виразу, навпаки, має менші значення для тіні. Індекс має вищі значення у тінювих ділянках знімка.

Також, у багатьох роботах для ідентифікації тіні застосовувалися методи контрольованої класифікації, такі як метод опорних векторів [105, 106].

3.3.2 Автоматична бінаризація зображення для отримання маски тіней

Для отримання бінарної маски тіні зображення розрахованих спектральних індексів і у відтінках сірого повинні бути розбиті за яскравістю на дві групи за певним пороговим значенням T [58]. Порогове значення може підбиратися користувачем для кожного окремого зображення, але ефективніше застосовувати автоматичні методи визначення оптимального порогу. Для автоматизації процедури знаходження порогового значення застосовується метод Оцу [97, 100, 107, 108].

У методі Оцу для знаходження оптимального порогу використовується гістограма зображення. Гістограма розбивається на два класи таким чином, щоб їх гістограми були якомога більш щільними. Математично необхідно виконати мінімізацію дисперсій двох класів:

$$\sigma_w^2 = w_1 \sigma_1^2 + w_2 \sigma_2^2, \quad (2.30)$$

де w_1 та w_2 – ймовірність першого та другого класу відповідно:

$$w_1(t) = \frac{1}{N_T} \sum_{i=0}^{t-1} p(i) = \sum_{i=0}^{t-1} N(i), \quad w_2(t) = 1 - w_1(t), \quad N_T = \sum_{i=0}^{\max(X)} p(i), \quad (2.31)$$

N_T – гістограма зображення.

У своїй роботі Оцу показав, що мінімізація внутрішньої дисперсії класів еквівалентна мінімізації дисперсії між класами, яка дорівнює [108]:

$$\sigma_b^2 = w_1 w_2 (\mu_1 - \mu_2)^2, \quad (2.32)$$

μ_1 та μ_2 – середні арифметичні значення для кожного з класів:

$$\mu_T = \frac{1}{N_T} \sum_{i=0}^{\max(X)} i \cdot p(i) = \sum_{i=0}^{\max(X)} i \cdot N(i), \quad (2.33)$$

$$\mu_1 = \frac{1}{N_T \cdot w_1(t)} \sum_{i=0}^{t-1} i \cdot p(i) = \frac{1}{w_1(t)} \sum_{i=0}^{t-1} i \cdot N(i), \quad \mu_2(t) = \frac{\mu_T - \mu_1(t) \cdot w_1(t)}{w_2(t)}$$

Для зображення $X(i, j)$, де i та j – розміри зображення, алгоритм пошуку оптимального порогу складається з наступних кроків:

- 1) розраховується гістограма зображення $p(l)$ та частота $N(l)$ для кожного значення яскравості зображення X ;
- 2) знаходяться початкові значення для $w_1(0)$, $w_2(0)$, $\mu_1(0)$, $\mu_2(0)$;
- 3) для кожного значення яскравості гістограми $t = \overline{1, \max(X)}$:
 - 1) оновлюються значення μ_1 , μ_2 , w_1 , w_2 ;
 - 2) розраховується $\sigma_b^2(t) = w_1(t)w_2(t)[\mu_1(t) - \mu_2(t)]^2$;
 - 3) якщо $\sigma_b^2(t)$ більше, ніж поточна дисперсія між класами, то її значення запам'ятовується, $T = t$;
 - 4) оптимальний поріг відповідає максимуму дисперсії між класами $\sigma_b^2(t)$.

На рис. 3.12 показано гістограму спектрального індекса NSVDI. Вісь абсцис відповідає значенням пікселів, а вісь ординат частоті, з якою зустрічається кожне значення.

Знайдений за методом Оцу оптимальний поріг відмічено червоною лінією. Значення пікселів, отриманих індексів, були приведені до діапазону значень $[0, 255]$. Для усіх індексів, чим вище значення пікселя, тим більша ступінь його належності до тіні, тому, частина гістограми, що відповідає вищим значенням пікселів, інтерпретується як тінь. Після розбиття гістограми за оптимальним порогом отримуємо бінарну маску тіні (рис. 3.13).

Оптимальний поріг розбиття гістограми було отримано для усіх розрахованих індексів. Результати їх бінаризації показано на рисунках 3.13 – 3.19. Знайдені тіньові ділянки на рисунках відмічені чорним кольором.

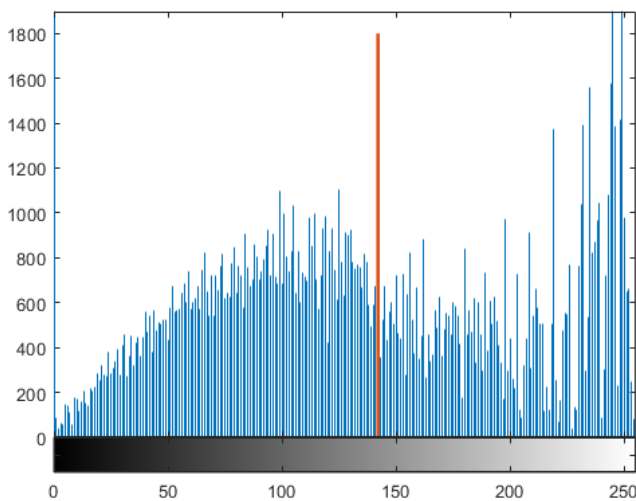


Рисунок 3.12 – Гістограма спектрального індекса NSVDI



Рисунок 3.13 – Результат бінаризації спектрального індекса NSVDI

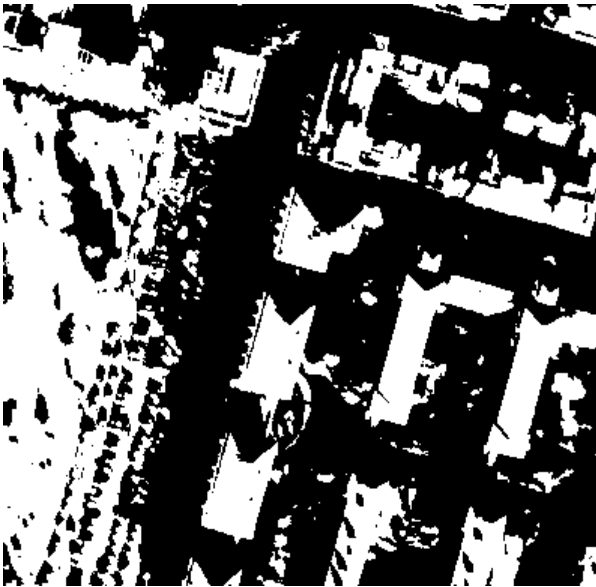


Рисунок 3.14 – Результат бінаризації компоненти зображення V у кольоровому просторі HSV

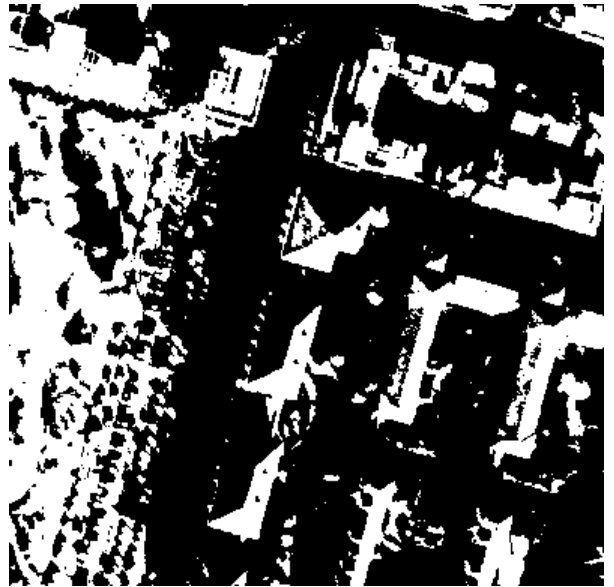


Рисунок 3.15 – Результат бінаризації компоненти зображення I у кольоровому просторі HSI

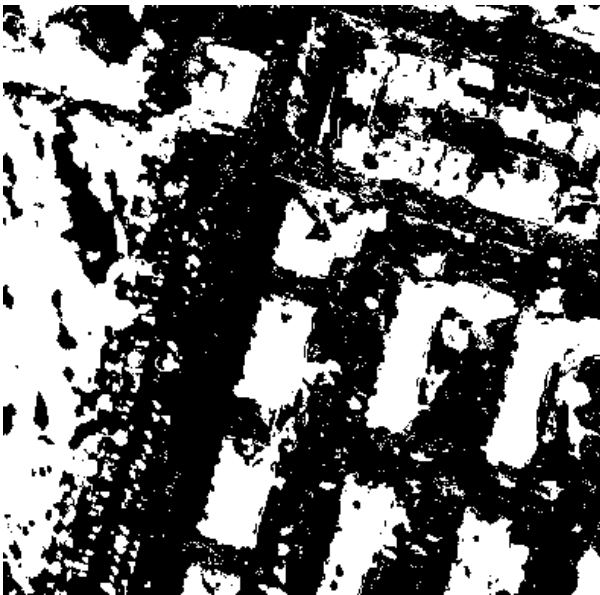


Рисунок 3.16 – Результат бінаризації спектрального відношення $r(x)$



Рисунок 3.17 – Результат бінаризації спектрального відношення $r_2(x)$

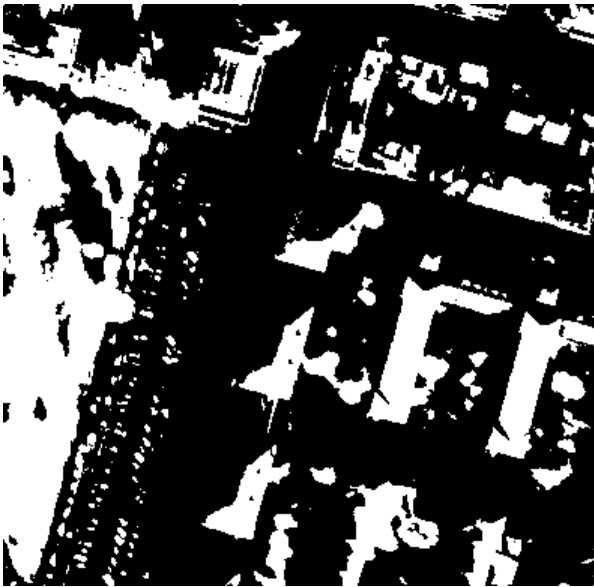


Рисунок 3.18 – Результат бінаризації спектрального індекса SDI

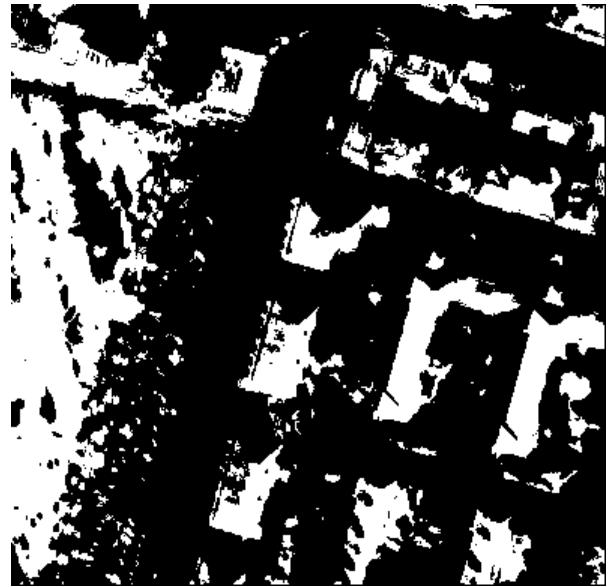


Рисунок 3.19 – Результат бінаризації спектрального індекса SDI₂

3.3.3 Порівняння точності методів ідентифікації тіні

Для оцінки точності ідентифікації тіні використано оцінки, що застосовуються для порівняння бінарних класифікаторів [81, 82]. Щоб оцінити точність знаходження тіньових пікселів, необхідно мати еталонне зображення маски тіні. Отримані у результаті бінаризації маски тіні порівнюються з еталонною маскою тіні, що показана на рис. 3.20. Для задачі, що вирішується, пікселі, що належать тіні, позначаються як 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;

Множини пікселів TP, TN, FP, FN можуть бути знайдені за допомогою матриці похибок [109, 110].



Рисунок 3.20 – Еталонне зображення бінарної маски тіні

За цими даними можна розрахувати наступні метрики якості precision (точність) recall (повнота), specificity (специфічність) та accuracy (точність по всім пікселям) [111]:

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP}, \text{ показує частку вірно ідентифікованих пікселів}$$

серед усіх пікселів, що були ідентифіковані як тіньові;

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN}, \text{ показує частку вірно ідентифікованих пікселів серед}$$

усіх тіньових пікселів;

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}, \text{ показує частку вірно ідентифікованих}$$

пікселів серед загальної кількості пікселів;

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \text{ показує частку вірно ідентифікованих нетіньових}$$

пікселів серед пікселів, що ідентифіковані як тіньові.

Чим вищі показники повноти і точності, тим краща якість ідентифікації тіні. Максимальні показники точності та повноти не можуть бути досягнуті одночасно, тому вводиться метрика, яка поєднує інформацію про точність і повноту. Такою метрикою є F -метрика, яка являється гармонійним середнім між точністю та повнотою. Точність і повнота у метриці мають рівну вагу, тому значення F -метрики будуть зменшуватись однаково при зменшенні обох параметрів.

$$F_1 = \frac{2 \cdot Precision \cdot Recall}{Precision + Recall}, F_1 \in [0,1]. \quad (2.34)$$

Intersection Over Union (IOU) [112] – відношення між перетином еталонних та ідентифікованих як тіні пікселів та загальною кількістю пікселів:

$$IOU = \frac{TP}{TP + FP + FN}. \quad (2.35)$$

Усі наведені метрики приймають значення у діапазоні $[0,1]$. Чим вище значення метрики, тим кращий результат ідентифікації. У таблиці 3.1 приведені результати розрахунків метрик для масок тіні, отриманих в результаті бінаризації.

Таблиця 3.1 – Результат розрахунку метрик якості бінаризації

	<i>Precision</i>	<i>Recall</i>	<i>Specificity</i>	<i>Accuracy</i>	F_1	<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 були досягнуті для маски, отриманої у результаті бінаризації спектрального індексу NSVDI. Виходячи з отриманих результатів, цей індекс в подальшому використовується у розробленій технології для ідентифікації тіні.

3.4 Метод компенсації тіні

Після отримання бінарної маски тіні, проводиться компенсація тіні у отриманих тіньових ділянках зображення. Для покращення освітленості у тіньових ділянках було застосовано модель утворення тіні, яка базується на фізичних принципах розповсюдження сонячного випромінювання [113, 114]. 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. Нетіньові ділянки освітлені обома типами випромінювання, тіньові – лише відбитим випромінюванням. Модель освітленості пікселя зображення представляється формулою:

$$I(x) = R(x) \cdot L(x), \quad (2.36)$$

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:

$$L(x) = L_D(x) + L_R(x). \quad (2.37)$$

З (2.37) та (2.36) отримуємо вирази освітленості для тіньових та нетіньових ділянок зображення:

$$\begin{aligned} I_{lit}(x) &= R(x) \cdot L_D(x) + R(x) \cdot L_R(x), \\ I_{shd}(x) &= \eta(x) \cdot L_R(x) \cdot R(x), \end{aligned} \quad (2.38)$$

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

За формулами (2.38), отримуємо нові значення для пікселів у тіньових ділянках:

$$\begin{aligned} I_C(x) &= R(x) \cdot L_D(x) + \frac{1}{\eta(x)} \cdot I_{shd}(x), \\ I_C(x) &= A(x) + \gamma(x) \cdot I_{shd}(x), \end{aligned} \quad (2.39)$$

де параметри A та γ розраховуються наступним чином:

$$A(x) = \mu(B) - \gamma \cdot \mu(S), \quad \gamma(x) = \frac{1}{\eta(x)} = \frac{\sigma(B)}{\sigma(S)}, \quad (2.40)$$

де $\mu(B)$ та $\mu(S)$ – середні значення пікселів у нетіньових та тіньових ділянках відповідно, $\sigma(S)$ та $\sigma(B)$ – стандартні відхилення пікселів у тіньових та нетіньових ділянках, $I_C(x)$ – нові значення окремих пікселів у тіньових ділянках. Щоб знайти нові середні значення та стандартні відхилення тіньових ділянок, використовуються середні значення та стандартні відхилення нетіньових ділянок:

$$\mu(S) = \frac{1}{N_S} \sum_x I_{shd}(x), \quad \mu(B) = \frac{1}{N_B} \sum_x I_{lit}(x),$$

$$\sigma(B) = \sqrt{\frac{\sum_x I_{lit}^2(x)}{N_B} - \left(\frac{\sum_x I_{lit}(x)}{N_B}\right)^2}, \quad (2.41)$$

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{\sum_x I_{shd}^2(x)}{N_S} - \left(\frac{\sum_x I_{shd}(x)}{N_S}\right)^2}.$$

До усіх тінювих пікселів застосовується формула (2.39), параметри A та γ розраховуються за значеннями пікселів у тінювих ділянках. На рис. 3.21 показано результат застосування методу компенсації тіні до супутникового зображення.



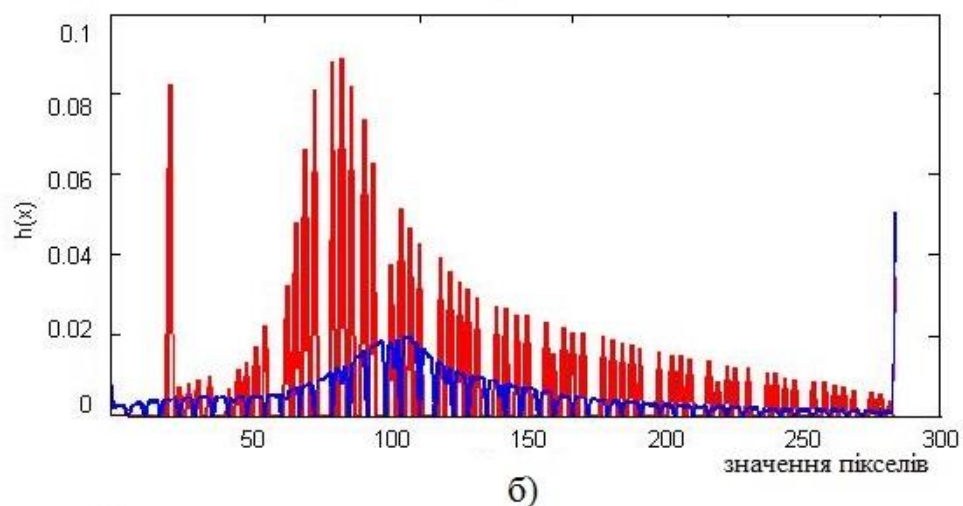
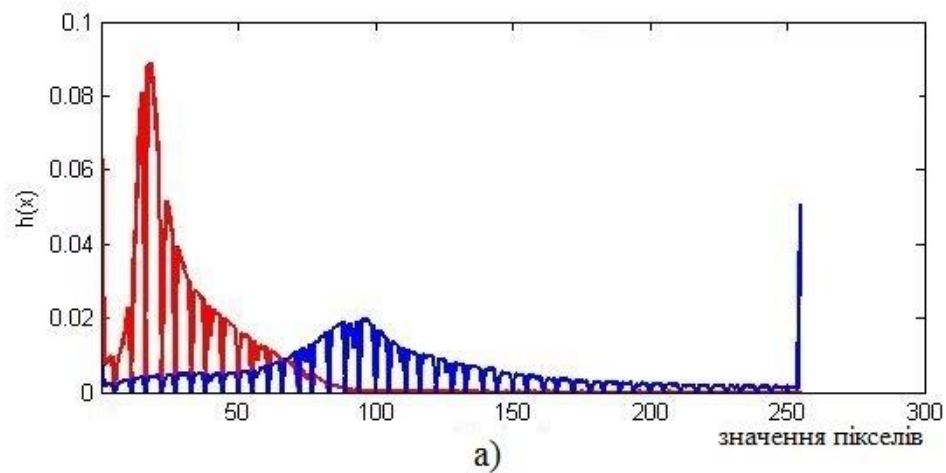
а)

б)

Рисунок 3.21 – Супутникове зображення до (а) та після (б) застосування до нього методу компенсації тіні

Після обробки пікселів тіньових ділянок можливо побачити, що освітленість у них значно змінилась. На рис. 3.22 показані гістограми яскравості пікселів у тіньових та нетіньових ділянках зображення. На рис. 3.22, а) показані гістограми до застосування методу компенсації, а на рис. 3.22, б) – після. На рис. 3.22 гістограми тіньових ділянок зображені червоним кольором, а нетіньових – синім. Після обробки розподіл пікселів тіньових ділянок наблизився до розподілу пікселів нетіньових ділянок. Це обумовлено приведенням статистичних характеристик пікселів тіньових ділянок до пікселів нетіньових ділянок.

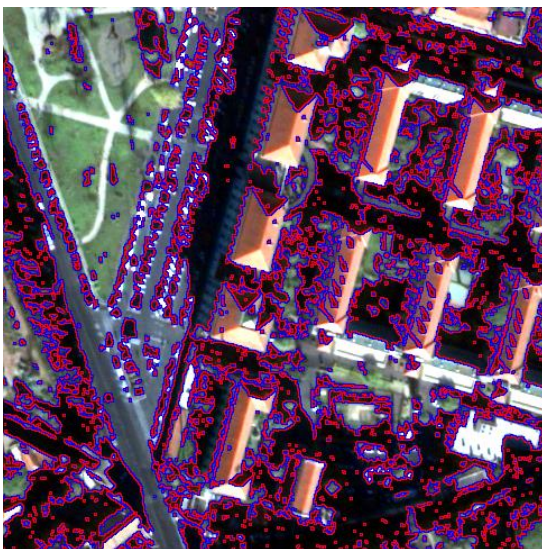
На рис. 3.23 показані гістограми пікселів всього зображення до (рис. 3.23, а) та після (рис. 3.23, б) застосування до них методу компенсації тіні. Після обробки динамічний діапазон значень яскравості пікселів стає більш наближеним до нормального розподілу, що говорить про покращення освітленості зображення.



Щоб вирішити цю проблему було запропоновано метод обробки границь тіньових ділянок зображення. Після застосування методу границі тіньових ділянок стають більш згладженими та перепади яскравості стають меншими.

Було знайдено внутрішні та зовнішні границі тіньових ділянок зображення, на рис. 3.24, а) границі тіньових ділянок виділено, відповідно, червоним та синім кольором. Ширина границь складає один піксель, при цьому зовнішня границя належить до нетіньових ділянок зображення. Через неоднорідність тіні пікселі, що знаходяться на краю тіньових ділянок, отримують більше світла. Ідея методу полягає у тому, щоб зробити різницю у освітленні до та після компенсації тіні менш помітною. Індекс NSVDI показує освітленість пікселя, тому він був використаний для обробки внутрішньої границі тіні. Спочатку індекс було приведено до діапазону $[0,1]$. Вздовж границі індекс NSVDI має нижчі значення, щоб понизити яскравість пікселів внутрішньої границі було застосовано формулу:

$$I_B(x) = I_{shd}(x) + (I_C(x) - I_{shd}(x)) \cdot NSVDI(x). \quad (2.42)$$



а)



б)

Рисунок 3.24 – (а) границі тіньових (червоний) та нетіньових(блакитний) ділянок зображення; (б) результат обробки границь тіньових ділянок

Для обробки зовнішньої границі було використано усереднюючий фільтр з матрицею 3x3. Результат обробки границь тіньових ділянок показано на рис. 3.24, б).

3.6 Дослідження властивостей тіней у кольоровому просторі HSV

Для вдосконалення методу компенсації тіні ми запропонували розраховувати параметри A та γ для кожної тіньової ділянки зображення окремо. Щоб визначити, які саме ділянки повинні використовуватися при розрахунку параметрів, було досліджено властивості тіні у інваріантному кольоровому просторі HSV [19]. Згідно з попередніми дослідженнями, тіні мають наступні властивості у кольорових просторах HSV та RGB [115]:

- усі компоненти зображення у кольоровому просторі RGB мають менші значення у тіні;
- компонента кольору у кольоровому просторі HSV має приблизно однакові значення у тіньових та нетіньових ділянках зображення;
- компонента яскравості у кольоровому просторі HSV має менші значення у тіньових ділянках зображення;
- компонента насиченості у кольоровому просторі HSV має менші значення у тіньових ділянках зображення;

Щоб дослідити, як властивості зображення змінюються у тіні, було взято зразки типових поверхонь, що зустрічаються на супутникових знімках. Частина поверхні, на кожному зображенні, знаходиться у тіні (рис. 3.25). Зразки зображень було трансформовано з кольорового простору RGB у кольоровий простір HSV, далі було розраховано середні значення властивостей пікселів у тіньових та нетіньових частинах зображення.

У таблиці 3.2 показані середні значення пікселів червоного, зеленого, синього каналів, компоненти кольору (H), насиченості (S) та яскравості (V) у

тінювих та нетінювих ділянках деяких зображень зразків поверхонь. У рядках «різниця» вказано – наскільки відрізняються значення компонент у тіні та поза тінню. Після трансформації у інваріантний кольоровий простір HSV, його компоненти мають наступні діапазони значень: $H \in [0, 360]$, $S \in [0, 1]$, $V \in [0, 1]$. Для зручності вони були приведені до діапазонів: $H \in [0, 255]$, $S \in [0, 255]$, $V \in [0, 255]$. Пікселі червоного, синього та зеленого каналів також мають діапазон значень $[0, 255]$.



Рисунок 3.25 – Зразки зображень типових поверхонь, які зустрічаються на супутникових знімках

Результати показали, що властивості розрахованих компонент змінюються у тіні. Майже у всіх випадках значення компонент у кольоровому просторі RGB стають значно меншими у тінювих ділянках. Компонента яскравості V теж зменшується.

На відміну від результатів, приведених у [115], наші дослідження показали, що компонента насиченості S не завжди зменшується у тіні, вона, також, може збільшуватись. Абсолютна різниця у значеннях насиченості тінювих та нетінювих ділянок, у більшості випадках не перевищує 40 рівнів яскравості. Компонента кольору залишається майже незмінною у тінювих та нетінювих ділянках зображення. Лише у випадках, коли поверхня має дуже низьку або дуже високу яскравість, різниця насиченості може перевищувати 40, а компонента кольору може значно змінюватись. Дослідження показали,

що компоненти кольору та насиченості можуть бути використані для пошуку тінювих та нетінювих ділянок, які належать до одного типу поверхні.

Таблиця 3.2 – Середні значення та абсолютна різниця компонент зображення у тінювих та нетінювих ділянках

		R	G	B	H	S	V
№ 1	Не тінь	239	240	238	136	45	241
	Тінь	115	129	135	145	4	125
	Різниця	124	111	103	9	41	116
№ 2	Не тінь	22	20	33	176	108	34
	Тінь	9	6	13	188	137	13
	Різниця	13	14	20	12	29	21
№ 3	Не тінь	237	41	60	251	213	237
	Тінь	118	26	31	250	217	114
	Різниця	119	15	29	1	4	123
№ 4	Не тінь	85	117	60	70	118	121
	Тінь	9	18	8	73	150	17
	Різниця	76	99	52	3	32	104
№ 5	Не тінь	68	95	161	160	152	160
	Тінь	41	43	84	163	150	83
	Різниця	27	52	77	3	2	77
№ 6	Не тінь	135	48	64	247	164	132
	Тінь	76	36	45	245	134	76
	Різниця	59	12	19	2	30	56
№ 7	Не тінь	252	208	15	34	252	255
	Тінь	95	59	3	27	249	91
	Різниця	157	149	12	7	3	164
№ 8	Не тінь	218	221	225	161	25	226
	Тінь	117	138	161	159	66	159
	Різниця	101	83	64	2	41	67
№ 9	Не тінь	76	105	118	140	90	118
	Тінь	9	13	13	151	137	13
	Різниця	67	92	105	11	47	105
№10	Не тінь	115	191	121	88	97	187

	Тінь	47	72	52	100	125	72
	Різниця	68	119	69	12	28	115

3.7 Метод компенсації тіні з урахуванням параметрів для різних тіньових ділянок

Нові значення пікселів у тіньових ділянках зображення визначаються двома параметрами A та γ . Значення параметрів визначаються вибором тіньових та відповідних до них нетіньових ділянок. Різні типи поверхонь, що зустрічаються на супутникових знімках, мають різні властивості відбиття та поглинання сонячного випромінювання, тому, щоб покращити результат компенсації тіні було запропоновано пошук ділянок, що належать до одного типу поверхонь.

На рис. 3.26 показано фрагмент супутникового зображення та результат його сегментації. Для пошуку парних тіньових та нетіньових ділянок необхідно поділити зображення на сегменти. Для цього був використан метод багатомасштабної сегментації. Тіньові сегменти були визначені за допомогою індексу NSVDI, тільки замість значень NSVDI окремих пікселів було взято значення NSVDI сегментів.



а)

б)

Рисунок 3.26 – Фрагмент супутникового знімка (а) та результат його сегментації (б)

Для визначення парних тінювих та нетінювих сегментів, компоненти H, S та V для кожного сегменту були розраховані. Для кожного тінювого сегмента парний нетінювий сегмент знаходився за допомогою метрик M_{dist} , M_S , M_V , M_H , які описують відстань між властивостями сегментів:

$$\begin{aligned}
 M_{dist} &= \sqrt{(x_{shd} - x_{lit})^2 + (y_{shd} - y_{lit})^2}, \quad M_{Sat} = |Sat_{shd} - Sat_{lit}|, \\
 M_{Val} &= |Val_{shd} - Val_{lit}|, \\
 M_{Hue} &= \text{MIN}(|Hue_{shd} - Hue_{lit}|, 255 - |Hue_{shd} - Hue_{lit}|),
 \end{aligned}
 \tag{2.43}$$

де Hue_{shd} , Hue_{lit} , Sat_{shd} , Sat_{lit} , Val_{shd} , Val_{lit} – компоненти H, S, V у відповідних тінювих та нетінювих сегментах. Метрика M_{dist} характеризує відстань між сегментами. Для кожного тінювого сегмента відповідний нетінювий сегмент шукався на відстані, що не перевищує його довжину. Далі серед сусідніх сегментів обирався той, що має найменше значення метрики M_H , та для якого M_S та M_V не перевищували заданих значень. Якщо для окремого тінювого сегмента знайдено відповідний нетінювий сегмент, то параметри A та γ розраховують по середнім значенням та стандартним відхиленням цієї пари. Якщо для тінювого сегмента не можливо знайти відповідний нетінювий, параметри A та γ для нього знаходяться за тінювою та нетінювою частинами усього знімка. На рис. 3.27 показано результат компенсації тіні без пошуку парних сегментів та з пошуком парних сегментів. На рис. 3.28 – результат обробки границь тінювих ділянок після компенсації тіні з пошуком парних сегментів.

3.8 Оцінка результатів роботи методу

Для оцінки якості обробки зображень використовують різні методи. Найбільш ефективні з них методи, які базуються на порівнянні обробленого зображення з еталонним. Еталонне зображення являє собою ідеальний результат, який бажано отримати розробленим методом. Зазвичай еталонне зображення отримується шляхом ручної обробки, наприклад для задач класифікації та ідентифікації об'єктів.



Рисунок 3.27 – Результат компенсації тіні без пошуку парних сегментів (а), та з пошуком парних сегментів (б)

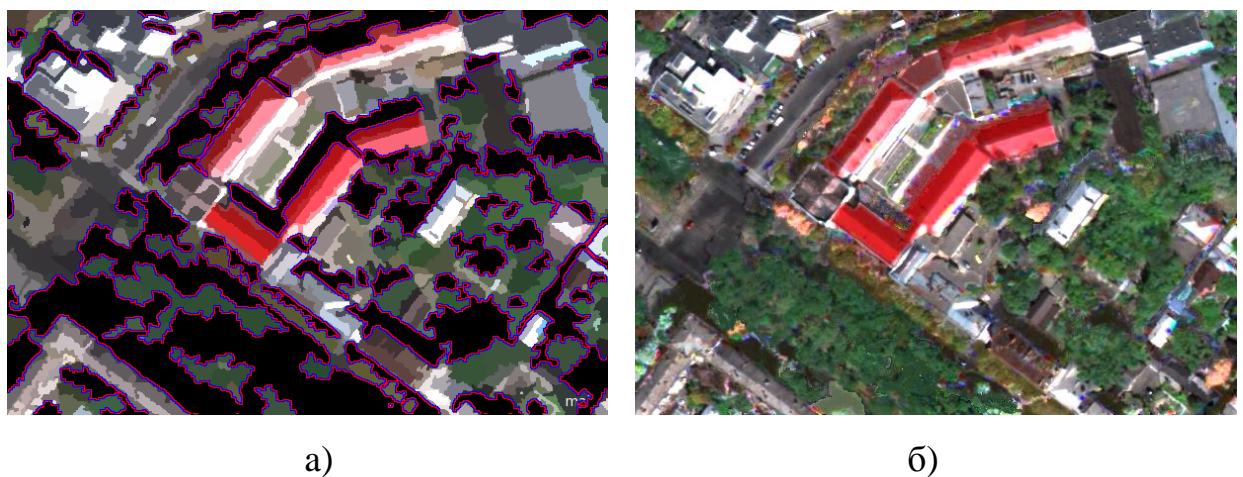


Рисунок 3.28 – (а) границі тіньових (червоний) та нетіньових(блакитний) ділянок зображення; (б) результат обробки границь тіньових ділянок

Щоб оцінити якість компенсації тіні для звичайних знімків, отриманих цифровою камерою, у роботі [106] проводилось порівняння результату з

еталонним зображенням за середньою квадратичною похибкою (root mean square error or RMSE). У [116, 117] використовувались такі оцінки якості, як коефіцієнт кореляції (CC), RMSE, відносна середня спектральна похибка (Relative average spectral error or RASE), глобальна похибка синтезу зображення (relative dimensionless global error in synthesis ERGAS) та пікове відношення сигналу до шуму (peak signal to noise ratio PSNR). Перераховані оцінки якості потребують наявності еталонного зображення. Отримання еталонного супутникового знімка є неможливим через специфіку руху супутника та час проведення зйомки. Тому розроблений метод компенсації тіні та його покращений варіант з пошуком парних тінювих та нетінювих сегментів перевірено на фотографіях, отриманих цифровою камерою. Були використані пари зображень, отримані фіксованою камерою. На зображеннях присутні різні типи поверхонь, частина одного з зображень знаходиться у тіні, друге зображення охоплює ту саму поверхню, але тінь на ньому відсутня (рис. 3.29, а), б)). Друге зображення використовувалося як еталонне.

На рисунку 3.29 показано тестове зображення, яке частково затінене, еталонне зображення та результат застосування до тестового зображення методу компенсації тіні з пошуком парних (рис. 3.29, в)) сегментів та без нього (рис. 3.29, г)).

Для оцінки якості роботи методу використано наступні оцінки якості: RMSE, RASE, PSNR.

RMSE, зазвичай застосовується для порівняння еталонного та обробленого зображень шляхом безпосередньо обчислення середньої різниці значень пікселів. Оброблене зображення найбільш схоже на еталонне, коли значення RMSE дорівнює нулю [116].

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_r(i, j) - I_p(i, j))^2}, \quad (2.44)$$

де $I_r(i, j)$ – піксель еталонного зображення, $I_p(i, j)$ – піксель обробленого зображення, N та M – розміри зображень. RMSE розраховується для кожного каналу окремо.

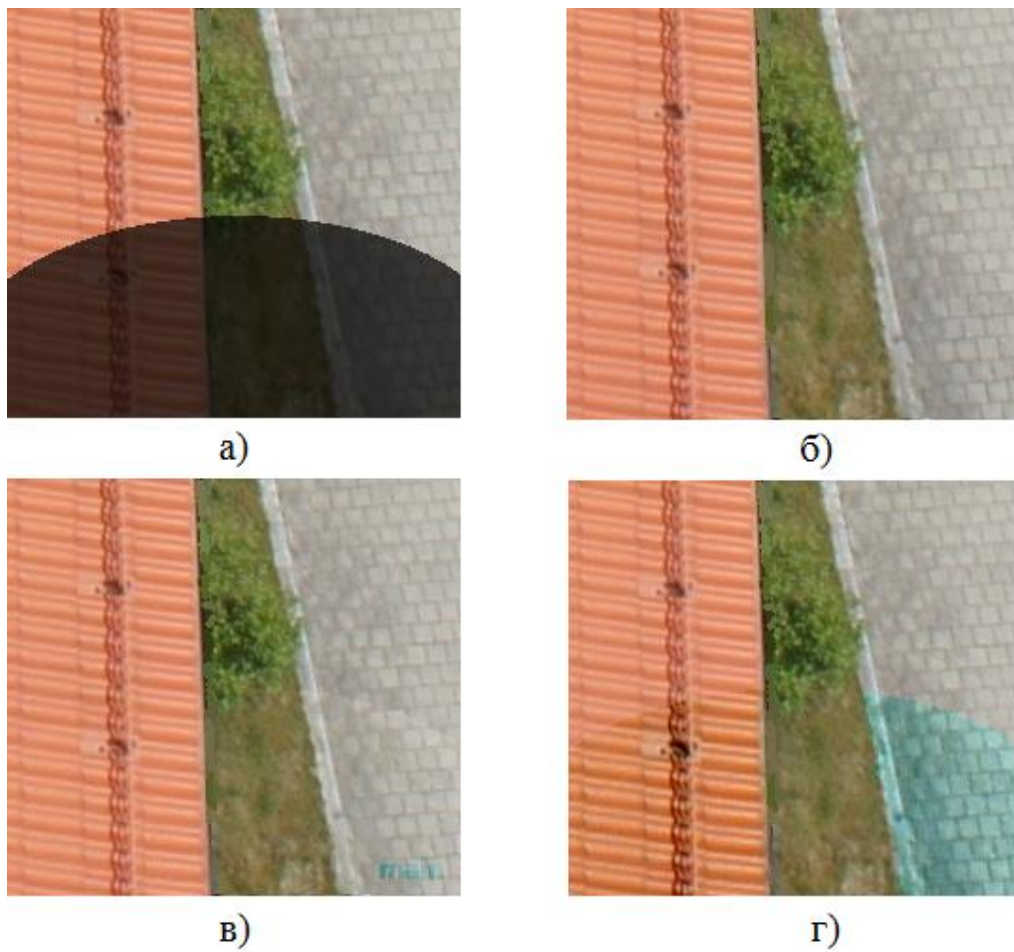


Рисунок 3.29 – (а) тестове зображення; (б) еталонне зображення; (в) результат компенсації тіні з пошуком парних сегментів; (г) результат компенсації тіні без пошуку парних сегментів

RASE – це аналог RMSE, який виражається у процентах для характеристики середньої продуктивності методу в усіх спектральних каналах [49]:

$$\text{RASE} = \frac{100}{\sum_{i=1}^K \mu_i} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \text{RMSE}_i^2}, \quad (2.45)$$

де K – кількість каналів, μ_i – середнє значення i -того каналу. RASE розраховується по всім спектральним каналам і є більш універсальною у окремих випадках [49].

PSNR це загально відома оцінка якості, вона розраховується шляхом ділення числа рівнів яскравості зображення на середню різницю пікселів обробленого та еталонного зображень. Якщо значення PSNR високе, то зображення, що порівнюються, схожі між собою [116].

$$\text{PSNR} = 20 \log_{10} \left(\frac{L^2}{\frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (I_r(i, j) - I_p(i, j))^2} \right), \quad (2.46)$$

де $I_r(i, j)$ та $I_p(i, j)$, відповідно, – пікселі обробленого та еталонного зображень, N та M – розміри зображень, L – число рівнів яскравості зображень.

У таблиці 3.3 показані результати розрахунку оцінок якості.

Таблиця 3.3 – Результати розрахунку оцінок RMSE, RASE та PSNR

	Метод компенсації тіні з пошуком парних сегментів			Метод компенсації тіні без пошуку парних сегментів		
	R	G	B	R	G	B
RMSE	5.3	4.4	3.3	17.9	6.3	11.8
PSNR	67.07	70.39	75.35	46.1	64.17	53.4
RASE	1.02			2.95		

З таблиці 3.3 видно, що після застосування, під час компенсації тіні, пошуку парних ділянок якість роботи методу покращилась.

3.9 Висновки до розділу

У цьому розділі представлено розроблену технологію ідентифікації та компенсації тіней на фотограмметричних зображеннях високої просторової розрізненості, зокрема отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3.

1. Досліджено різні способи ідентифікації тіні. Ідентифікацію тіні здійснено на основі наступних індексів та компонент зображення у інваріантних кольорових просторах: I, NSVDI, SDI, SDI_2 , $r(x)$, $r_2(x)$, V. Перераховані індекси та компоненти бінаризуються за пороговим значенням. Після розрахунку оцінок точності ідентифікації тіні визначено, що для поставленої задачі найбільш підходить індекс ідентифікації тіні NSVDI.

2. Реалізовано метод ідентифікації тіні, в якому для автоматичного знаходження оптимального порогу бінаризації використовувався метод Оцу.

3. Реалізовано метод компенсації тіні, оснований на моделі утворення тіні, що базується на фізичних принципах розповсюдження сонячного випромінювання. Розроблена реалізація методу успішно застосована до знімків, отриманих супутниками WorldView-2 та WorldView-3.

4. Досліджено властивості тіні у інваріантному кольоровому просторі HSV. Щоб дослідити, як властивості зображення змінюються у тіні, взято зразки типових поверхонь, що зустрічаються на супутникових знімках. На основі дослідження зроблено висновок, що для пошуку тіньових та освітлених ділянок земної поверхні, що відносяться до одного типу, найкраще підходять компоненти зображення H та S у кольоровому просторі HSV.

6. Вдосконалено метод компенсації тіні. На основі дослідження властивостей тіней у метод впроваджено пошук ділянок, що належать до одного типу поверхонь. Якщо для окремого тіньового сегмента існує відповідний нетіньовий сегмент, то параметри для обробки тіньового

сегмента розраховуються по середнім значенням та стандартним відхиленням цієї пари.

7. На базі досліджених методів ідентифікації тіней створено технологію ідентифікації та компенсації тіні. Комп'ютерна реалізація технології може бути успішно застосована для прикладних задач з обробки фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості.

8. Ефективність розробленої технології ідентифікації та компенсації тіні підтверджено розрахунком оцінок якості зображень RMSE, PSNR, RASE. Розраховані оцінки якості показали значне підвищення ефективності роботи запропонованого методу компенсації тіні після його вдосконалення

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора: [1, 7, 8, 19].

РОЗДІЛ 4 ГЕОМЕТРИЧНА КОРЕКЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ, ОТРИМАНИХ ПОЗДОВЖНІМИ ПЗЗ-СКАНЕРАМИ

4.1 Формування фотограмметричних зображень поздовжніми ПЗЗ-сканерами

Геометрична корекція – це важливий крок попередньої обробки даних дистанційного зондування [38, 41]. Аерокосмічні сканерні зображення, зазвичай, мають геометричні викривлення, викликані рухом апарату, умовами зйомки, конструкцією сканерної системи. На відміну від аналогової фотозйомки, що в один момент часу охоплює певну ділянку поверхні, поздовжні ПЗЗ-сканери, що встановлені на сучасних супутниках, отримують зображення шляхом послідовного сканування земної поверхні лінійкою детекторних елементів перпендикулярно або вздовж напрямку руху космічного апарату.

Більшість сучасних аерокосмічних систем ДЗЗ, зокрема супутники WorldView-2 та WorldView-3, обладнано 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. Двовимірне зображення формується з багатьох ліній, що мають ширину у один піксель у напрямку руху платформи. Ширина зображення у напрямку, перпендикулярному руху платформи, у пікселях дорівнює кількості детекторних елементів у лінійці. Наземна відстань, яку охоплює лінійка детекторних елементів, уздовж маршруту супутника називається *полосою огляду*. Кожна окрема лінія зображення має індивідуальні параметри зовнішнього орієнтування, тому виникає потреба у геометричній корекції зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами.

Наземна відстань, що відповідає одному пікселю, залежить від частоти дискретизації скануючої системи та швидкості платформи. Наземний інтервал дискретизації (Ground Sample Distance) уздовж та поперек руху скануючої системи, відповідно, отримується так:

$$\text{GSD}_x = v\Delta t, \quad \text{GSD}_y = \Delta y m_b = \Delta y \frac{h_g}{f}, \quad (4.1)$$

де Δt – інтервал дискретизації, v – швидкість руху платформи, h_g – висота, f – фокальна відстань оптичної системи, m_b – масштаб зображення, Δy – розмір пікселя у напрямку, перпендикулярному руху платформи.

Зазвичай, поздовжні ПЗЗ-сканери, оснащені декількома лініями детекторних елементів, які розміщені у одній фокальній площині. Це дає можливість отримувати стереознімки та вести зйомку у декількох спектральних діапазонах.

Лінії детекторних елементів, що відповідають мультиспектральним каналам, та одна панхроматична лінійка розташовані так, що їх проєкції на полюсу зйомки знаходяться у надирі. Проєкції додаткових панхроматичних лінійок детекторних елементів, що забезпечують стереозйомку, знаходяться спереду та позаду від надиру (рис. 4.1).

При отриманні зображень поздовжнім ПЗЗ-сканерами, виникають викривлення, які викликані тим, що кожна сканована лінія отримана незалежно від попередньої, геометричні параметри космічного апарату у момент зйомки кожної лінії можуть змінюватись [40].

4.2 Геометричні викривлення, що виникають при формуванні зображень

Геометричні викривлення, що виникають при отриманні ДДЗ, можна поділити на *систематичні* та *несистематичні*. *Систематичні* викривлення обумовлені конструкцією скануючої системи та її періодичним рухом під час отримання ДДЗ. Такі викривлення легко моделюються та можуть бути

повністю усунені на етапі попередньої обробки “сирих” даних. *Несистематичні* викривлення виникають через неконтрольований рух системи ДЗЗ під час отримання даних. Такі викривлення мають випадковий характер та потребують розробки методів для їх усунення. Несистематичні викривлення усуваються на більш пізніх етапах обробки ДДЗ, після радіометричної та атмосферної корекції [40].

Геометричні викривлення, також, можна поділити на декілька основних груп.

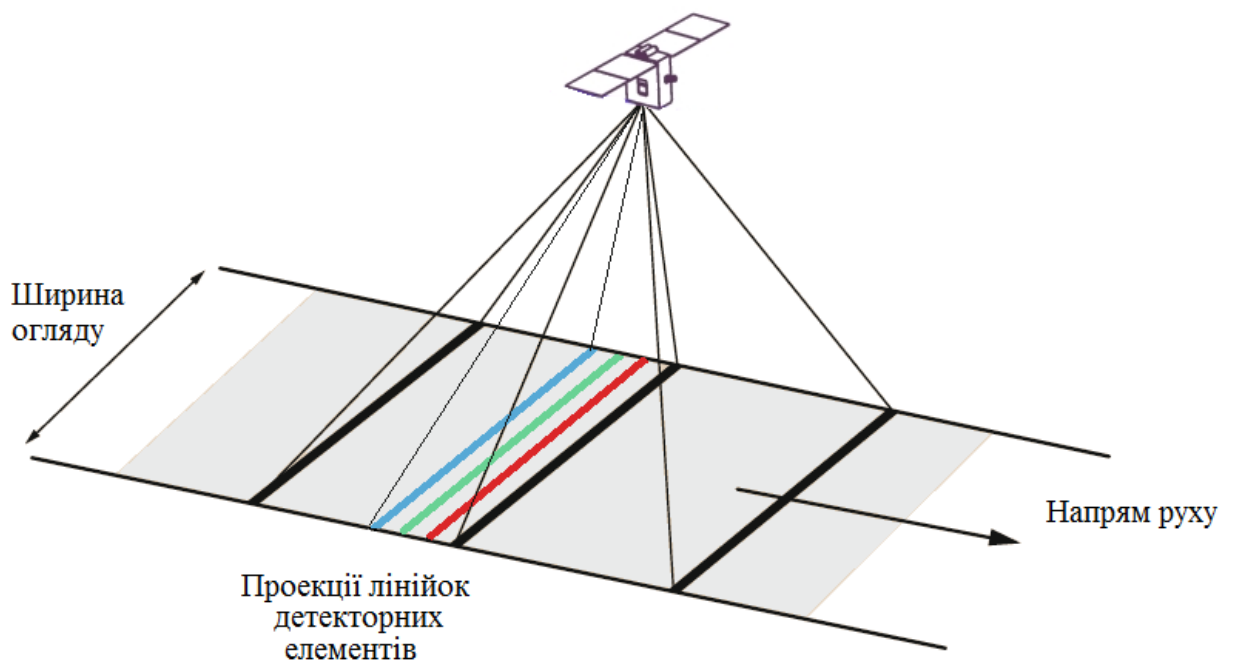


Рисунок 4.1 – Розташування лінійок детекторних елементів у поздовжніх ПЗЗ-сканерах

4.2.1 Викривлення, спричинені конструкцією скануючої системи

Інструментальні помилки у роботі скануючої системи трапляються через особливості її конструкції. Так у поперечних ПЗЗ-сканерах, оснащених рухомим дзеркалом (наприклад, Landsat MSS, TM, ETM+), рух має нелінійний характер, через це виникають геометричні викривлення. Також похибки виникають через дисторсію оптичної системи та через непостійний

інтервал фіксації ДДЗ. Інструментальні помилки можуть бути систематичними та несистематичними.

Панорамні викривлення виникають через те, що головна вісь оптичної системи не завжди направлена не вертикально. Коли сканер рухається вздовж лінії польоту супутника, об'єкти, які знаходяться уздовж полоси огляду, фіксуються лінійкою детекторних елементів під різними кутами (рис. 4.2, а)). Через це розміри об'єктів залежать від кута нахилу головної осі оптичної системи. Об'єкти зображення, що знаходяться ближче до краю полоси огляду, зазнають панорамних викривлень (рис. 4.2, б)).

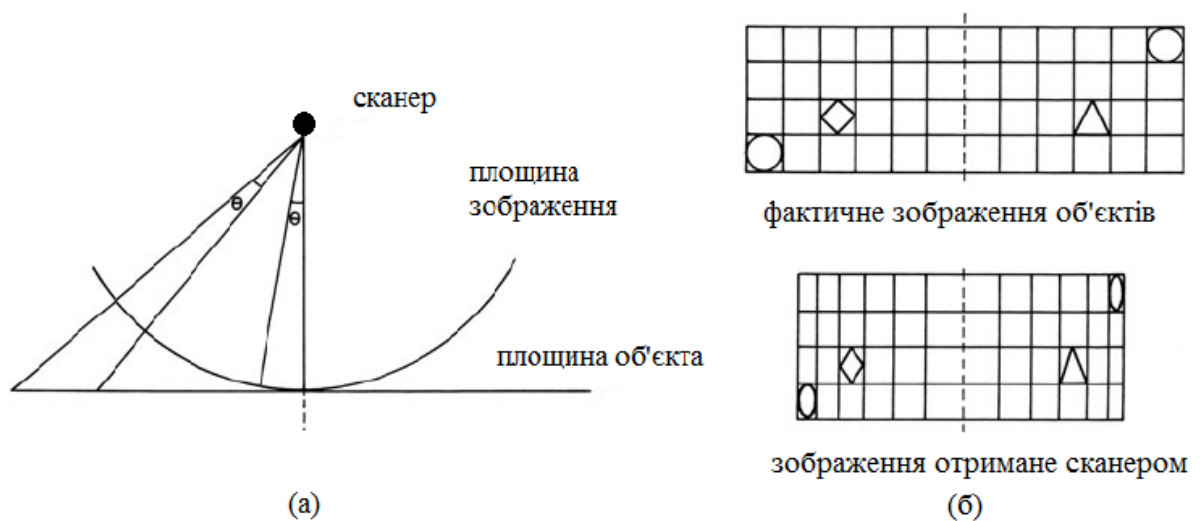


Рисунок 4.2 – (а) – можливі кути нахилу головної осі оптичної системи; (б) – панорамні викривлення об'єктів зображення

Масштабні викривлення виникають, коли масштаб зображення вздовж та поперек маршруту зйомки не однакові. Лінійний сканер фіксує ідеально правильне зображення земної поверхні, коли швидкість та висота супутника узгоджені з IFOV та частотою сканування уздовж та поперек маршруту зйомки. Будь які зміни у цих відношеннях призводять до надмірної чи недостатньої дискретизації уздовж або поперек маршруту зйомки. На рисунку 4.3 показано викривлення форми об'єкта у результаті надмірної дискретизації. Масштабні викривлення можуть бути систематичними, коли надмірна дискретизація обумовлена конструкцією сканерної системи

(наприклад, Landsat MSS), чи несистематичними, коли відношення висоти та швидкості змінюється випадково.

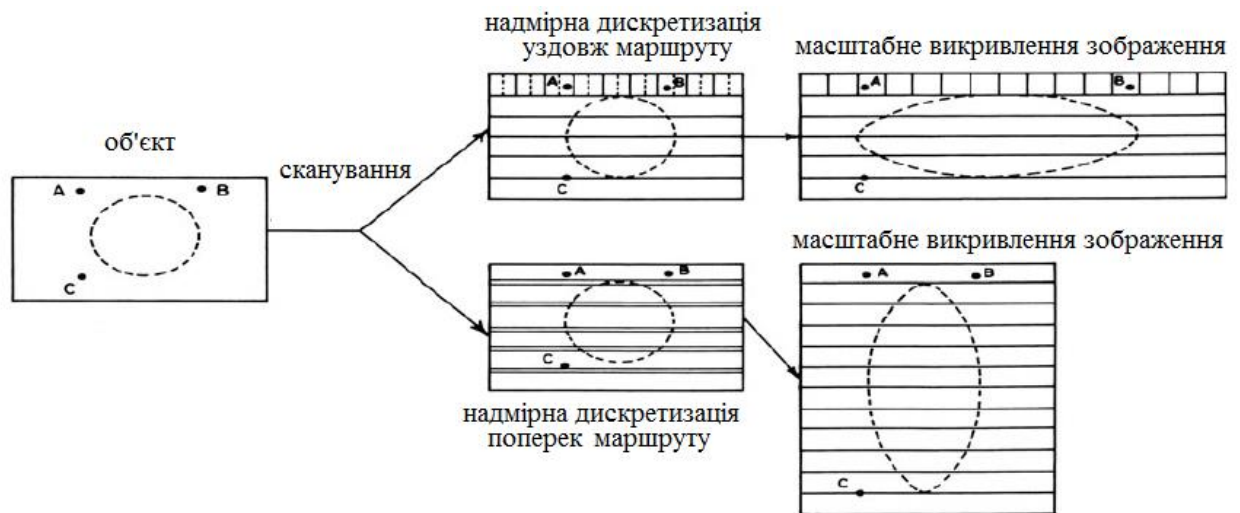


Рисунок 4.3 – Масштабні викривлення зображення у результаті надмірної дискретизації

У сканерних системах, обладнаних рухомим дзеркалом, лінійка детекторних елементів під час сканування однієї лінії даних просувається вздовж полоси огляду, що призводить до зсуву через зміну часу сканування. Такі викривлення мають систематичний характер та легко коректуються.

Також, викривлення ДДЗ виникають у процесі перетворення аналогового сигналу у цифровий. Дискретні значення, що являють собою середнє значення яскравості, присвоюються кожній дискретній одиниці зображення.

4.2.2 Викривлення, спричинені нестабільністю положення та зміною швидкості платформи скануючої системи

Один з головних параметрів, що впливає на геометричну якість зображення, це орієнтація головної оптичної осі. Коли оптична вісь направлена на надир, зображення зазнає мінімальних викривлень. Більшість

сканерних систем розраховані на роботу при ідеальних умовах, коли головна оптична вісь направлена на надир, але на практиці платформа системи ДЗЗ змінює свою орієнтацію під час руху. Через це виникають *кутові викривлення*. Орієнтація платформи описується трьома кутами: pitch, roll, yaw. Yaw – це обертання системи ДЗЗ навколо вертикальної осі, таке обертання призводить до зміни області, що покривається сканером, але при цьому деформації області, що зображується, не відбувається. Roll – це обертання навколо осі, що співпадає з напрямом руху системи ДЗЗ, воно призводить до зміни масштабу області, що зображується. Pitch – це обертання навколо осі, що перпендикулярна напрямку руху системи ДЗЗ, воно також призводить до зміни масштабу області, що зображується. Такі викривлення є несистематичними. На рисунку 4.3 показані викривлення, спричинені нахилом системи ДЗЗ.

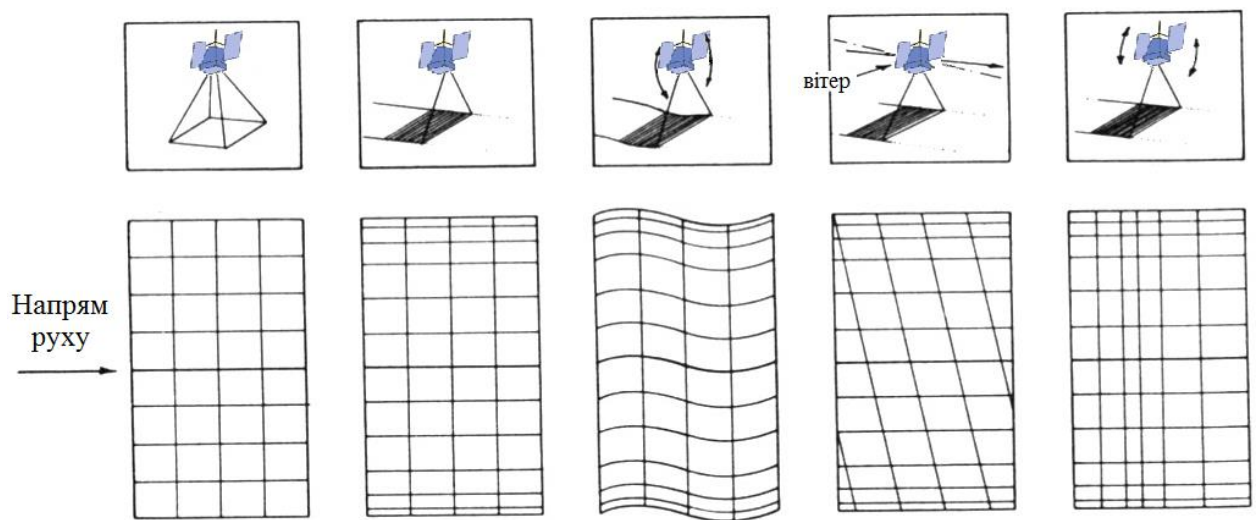


Рисунок 4.4 – Кутові викривлення, спричинені нахилом системи ДЗЗ

Окрім кутових викривлень, виникають *викривлення, спричинені зміною швидкості та висоти системи ДЗЗ*. Зміна цих двох параметрів призводить до несистематичних геометричних викривлень: зміни зони покриття скануючої системи, нерівномірної дискретизації у напрямку вектора швидкості. Для сканерів з рухомим дзеркалом головним фактором є відношення швидкості до висоти (V/H). Збільшення цього відношення

призводить до недостатньої дискретизації (пропуск деяких ділянок поверхні), а зменшення, навпаки, до надмірної (дублювання деяких ділянок поверхні).

У ПЗЗ-сканерах рух лінійки детекторних елементів супроводжується послідовною фіксацією випромінювання за певний проміжок часу, через це не виникає недостатньої чи надмірної дискретизації. Наземний інтервал, що відповідає детекторному елементу вздовж руху системи ДЗЗ, визначається швидкістю, висотою та частотою фіксації випромінювання. Наземний інтервал, що відповідає детекторному елементу поперек руху системи ДЗЗ, визначається висотою та IFOV. Зміни значення відношення швидкості до висоти (V/H) підчас фіксації даних призводять до масштабних викривлень. Збільшення H відносно V призводить до збільшення пікселя у напрямку, перпендикулярному руху космічного апарату, і навпаки. Зміна швидкості у відношенні (V/H) призводить до зміни розміру пікселя у напрямку руху, чим воно менше, тим менший розмір пікселя і навпаки.

4.2.3 Викривлення, пов'язані з формою та обертанням Землі

Для зображень, що охоплюють велику площу Землі, кривизна земної поверхні впливає на масштаб та спричиняє панорамні викривлення. Це явище зазвичай спостерігається у знімках, зроблених з великої висоти. Кривизна Землі змінюється залежно від широти, а отже, і ефекти кривизни Землі більш виражені на вищих широтах. Хоча форма Землі добре відома, при корекції зображення це розглядається як несистематичний тип спотворень. Через варіацію висоти об'єктів земної поверхні спостерігаються такі викривлення, як *зсув рельєфу*.

Зсув внаслідок обертання Землі зазвичай зустрічаються у зображеннях, отриманих з великої висоти лінійними ПЗЗ-сканерами та сканерами з рухомим дзеркалом. Ефект обертання Землі незначний при зйомці з невеликих висот. Супутник проходить орбітальний шлях навколо Землі, коли вона обертається навколо своєї осі із заходу на схід. Оскільки сканування

ліній, що складають зображення, відбувається з певною частотою, це призводить до зсуву ліній зображення.

4.3 Методи геометричної корекції викривлень, спричинених нестабільністю положення платформи аерокосмічного апарату у просторі

В залежності від типу викривлень, що присутні на ДЗЗ, застосовуються відповідні методи геометричної корекції. Двомірне зображення області земної поверхні отримується шляхом комбінацій окремих сканованих ліній. Кожна лінія фіксується при певних параметрах зовнішнього орієнтування, що описують положення системи ДЗЗ у глобальній системі координат. Для ПЗЗ-сканерів частота фіксації ліній становить декілька сотень герц (на секунду), разом зі сканерами на системах ДЗЗ є системи глобального позиціонування та орієнтації (positioning and orientation system POS), що дозволяють записувати данні про положення системи ДЗЗ та параметри зовнішнього орієнтування. 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 рисунку 4.5 показано фрагмент аерокосмічного знімка, отриманого поздовжнім ПЗЗ-сканером. Показане зображення не пройшло жодної геометричної корекції, на ньому присутні кутові, масштабні та панорамні викривлення. На рисунку 4.6 показано зображення тієї ж самої місцевості, воно отримане у інший час і пройшло геометричне трансформування.

Зображення, що оброблюється у цьому розділі, отримано з апарату, що проводить аерозйомку, обладнаного мультиспектральним ПЗЗ-сканером. Висота польоту знімального апарату 800 метрів, та просторове розрізнення приблизно 0,6 м.



Рисунок 4.5 – Фрагмент аерокосмічного знімка



Рисунок 4.6 – Аерокосмічний знімок, на якому усунено геометричні викривлення

Геометричне положення пікселів у площині зображення відносно площини об'єктів описується рівнянням колінеарності:

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \cdot \mathbf{R}^T \begin{bmatrix} X_i - X_s \\ Y_i - Y_s \\ Z_i - Z_s \end{bmatrix}, \quad (4.2)$$

де x_s та y_s – координати точки в координатній системі зображення, f – калібрована фокальна відстань оптичної системи, λ – масштабуючий

множник. Для зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами, $y_s=0$. X_s , Y_s , та Z_s – наземні координати центру проєкції, X_i , Y_i , Z_i – координати точки у земній системі координат, \mathbf{R} – матриця повороту системи координат, що описує кути повороту сканерної системи у просторі. Якщо відомі 6 параметрів зовнішнього орієнтування X_s , Y_s , Z_s , та 3 кути матриці повороту для кожної сканованої лінії супутникового знімка, можливо виконати його геометричну корекцію.

На практиці, елементи зовнішнього орієнтування не завжди є досконалими. Для зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами, використовують метод корекції по системі визначення позиції та орієнтації знімальної апаратури. Системи POS надають параметри зйомки кожної лінії, для розрахунку їх параметрів зовнішнього орієнтування, та прив'язки до наземних координат. Цей метод практичний і досить легко реалізується автоматичними засобами. Однак на остаточну точність корекції можуть впливати такі фактори, як низька точність системи POS, погана синхронізація між отриманням зображення і даними телеметрії, незбігом геометричного центру інерційної навігаційної системи, перспективним центром лінз датчика і фазовим центром антени глобальної системи позиціонування.

Для корекції зображень, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами успішно використовують наземні контрольні точки та лінійні елементи зображень [39, 118, 119]. У роботі [120] було розроблено алгоритм корекції викривлень, викликаних нестабільністю положення аерокосмічного апарату та особливостями фіксації супутникових знімків поздовжніми ПЗЗ-сканерами.

Використання лінійних об'єктів зображень разом з НКТ значно полегшує процес геометричної корекції і дозволяє повисити якість результату. В роботі здійснено геометричне трансформування аерокосмічного зображення з використанням лінійних об'єктів та НКТ.

4.4 Геометричних корекція сканерних зображень високої просторової розрізненості

4.4.1 Вхідні дані та вибір наземних контрольних точок

У розробленому 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. Для корекції знімка у даній роботі НКТ обиралися вручну. Згідно з дослідженням, проведеним у [120], НКТ повинні бути рівномірно розповсюджені на зображеннях та покривати майже всю їхню площу. Кількість НКТ була обрана згідно з експериментальними даними, у [120] для обробки ДДЗ високої просторової роздільної здатності схожими методами використовувалося від 4 до 11 НКТ.

Для корекції ефекту зміщення 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. Вони не обов'язково повинні бути прямими. Для цього можуть бути обрані такі об'єкти місцевості, як дороги, річки, границі двох різних типів поверхонь. На початку та кінці лінії, на еталонному зображенні та некоректованому зображенні поставлені НКТ.

Вхідними даними у реалізованому методі є набір координат НКТ та лінійні елементи, виділені на некоректованому та еталонному зображеннях (рис. 4.7, 4.8).

4.4.2 Автоматична ідентифікація лінійних об'єктів

На відміну від виділення НКТ, які можуть бути обрані вручну, точне виділення лінійних об'єктів зображення дуже трудомісткий процес. Тому, було реалізовано автоматизовану ідентифікацію лінійних об'єктів зображення.



Рисунок 4.7 – Результат класифікації та виділення на контрольному зображенні НКТ та лінійних об'єктів



Рисунок 4.8 – Результат класифікації та виділення на некоректованому зображенні НКТ та лінійних об'єктів

Для ідентифікації лінійних об'єктів до еталонного та некоректованого зображень було застосовано технологію дешифрування аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості, розроблену в [5, 18]. В результаті застосування технології дешифрування, зображення були сегментовані та на зображеннях було виділено різні класи. 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 рисунках 4.7, 4.8, було взято сегмент, що відповідає об'єкту класу “дорога”, було виділено границі сегмента. Для корекції використовувалась границя сегмента, що позначена на рисунках 4.7, 4.8 червоним.

4.4.3 Трансформування зображення

Спочатку зображення масштабується вздовж осей y та x . На рисунках 4.7, 4.8 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. Візьмемо лінії зображення у напрямку зйомки, між i та $i+1$ контрольними точками. Можна вважати, що параметр $X_M(i)$ у межах точок i та $i+1$ незмінний і визначається як:

$$X_M(i) = \frac{X_E(i+1) - X_E(i)}{X_T(i+1) - X_T(i)}, \quad (4.3)$$

де $X_E(i)$ та $X_T(i)$ – координата i -ї контрольної точки за віссю y , 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, відбувається масштабування по осі y , аналогічно масштабуванню по осі x :

$$Y_M(i) = \frac{Y_E(i+1) - Y_E(i)}{Y_T(i+1) - Y_T(i)}, \quad (4.4)$$

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 кутовими викривленнями.

Після масштабування по осям x та y виділений лінійний елемент на еталонному та трансформованому зображеннях має однакову довжину між НКТ. Кожній сканованій лінії зображень відповідає одна координата лінійного елемента, тоді можливо розрахувати зсув ліній трансформованого зображення відносно еталонного:

$$T_y^{\text{new}} = E_y - T_y, \quad (4.5)$$

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. 4.9.



Рисунок 4.9 – Результат геометричного трансформування аерокосмічного сканерного зображення

4.5. Висновки до розділу

1. У розділі досліджено процес формування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості, отриманих поздовжнім ПЗЗ-сканером. Визначено, як фізичні процеси, що виникають при формуванні зображень, впливають на тип геометричних викривлень.

2. Реалізовано метод геометричної корекції аерокосмічного знімка на основі НКТ та лінійних елементів зображення. Для автоматизованого виділення лінійних елементів застосовано розроблену у дисертаційній роботі технологію дешифрування багатовимірних фотограмметричних зображень високої просторової розрізненості. У результаті обробки аерокосмічного зображення, на якому присутні кутові викривлення, та еталонного аерокосмічного зображення отримані сегменти, що відповідають лінійним елементам. Однак якість виділення відповідних лінійних об'єктів на некоректованому та еталонному зображеннях може бути незадовільною,

якщо зображення отримані через довгий проміжок часу або коли спектральні діапазони зображень значно відрізняються.

3. Після автоматичної ідентифікації лінійних об'єктів на некоректованому та еталонному зображеннях було успішно реалізовано та застосовано метод геометричної корекції, оснований на масштабуванні та зсуві сканованих ліній. Реалізований метод також може бути застосований для корекції супутникових знімків високої просторової розрізненості.

Основні результати розділу опубліковано в роботах автора: [3, 5, 38].

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 бінарizzato 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 ПОСИЛАНЬ

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.
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.
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.
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.
5. Shedlovska Y. I., Hnatushenko V. V. Visual search algorithm for high resolution satellite imagery. *Системні технології*. 2017. No. 5 (112). P. 18–25.
6. 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.
7. Shedlovska Y. I., Hnatushenko V. V. Shadow Removal Algorithm With Shadow Area Border Processing. *2016 International Young Scientists Forum on Applied Physics*. October, 10 – 14, 2016. Kharkiv, Ukraine. Proceedings. 2016. P. 164–167.
8. 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.

9. 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.

10. 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. Днепрпетровск, Украина. Сборник тезисов. 2016. С. 363. 1 электрон. опт. диск (CD-R).

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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 електрон.опт. диск (CD-R).

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. Shedlovska 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.

19. Shedlovska 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.

20. Shelestov A., Sumilo L., Lavreniuk M., Vasiliev V., Bulanaya T., Gomilko I., Kolotii A., Medyanovskyi K., Skakun S. Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring on the Base of Intelligent Sensors for Smart City. *Advances in*

Intelligent Systems and Computing. 2019. Vol. 836. P. 134–145.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-97885-7_14

21. Hnatushenko V. V., Mozgovyi D. K., Vasyliiev V. V. Satellite Deforestation Monitoring as a Result of Mining. *Scientific bulletin of National Mining University*. – State Higher Educational Institution «National Mining University». Dnipro. 2017. No. 5 (161). P. 94–99.

22. Сизов А. П., Хабаров Д. А., Хабарова И. А. Новые подходы к разработке методики формирования семантической информации мониторинга земель на основе обработки и анализа картографической информации. *Геодезия и аэрофотосъемка*. 2018. №4. С. 434–441.

23. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Sumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Yailymova H. Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. Vol. 6, Issue 3. 2019. P. 572–582. <https://doi.org/10.1109/tbdata.2019.2940237>

24. Kussul N., Lavreniuk M., Sumilo L., Kolotii A., Rakoid O., Yailymov B., Shelestov A., Vasiliev V. Assessment of Sustainable Development Goals Achieving with Use of NEXUS Approach in the Framework of GEOEssential ERA-PLANET Project. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2019. Vol. 836. P. 146–155. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97885-7_15

25. 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.

26. 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.

27. Zoka M., Psomiadis E., Dercas N. The complementary use of optical and SAR data in monitoring flood events and their effects. *Proceedings*. 2018. Vol. 2. 644 (8 pages). <https://doi.org/10.3390/proceedings2110644>
28. Dadhich G., Miyazaki H., Babel M. Applications of Sentinel-1 synthetic aperture radar imagery for floods damage assessment: a case study of Nakhon SI Thammarat, Thailand. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2019. Vol. XLII-2/W13. P. 1927–1931. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-1927-2019>
29. Tsyganskaya V., Martinis S., Marzahn P., Ludwig R. SAR-based detection of flooded vegetation—a review of characteristics and approaches. *Int. J. Remote Sens.* 2018. Vol. 39. P. 2255–2293. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1420938>
30. Chang N.-B., Bai K. *Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing*. Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC CRC Press. 2018. 528 p. <https://doi.org/10.1201/9781315154602>
31. Чандра А. М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы. Москва, Техносфера. 2008. 312 с.
32. Ban H.-J., Kwon Y.-J., Shin H., Ryu H.-S., Hong S. Flood monitoring using satellite-based RGB composite imagery and refractive index retrieval in visible and near-infrared bands. *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. P. 313. <https://doi.org/10.3390/rs9040313>
33. Mason P. J., Liu. J. G. *Image processing and GIS for remote Sensing: Techniques and applications*. Chichester, West Sussex, John Wiley & Sons, Ltd., 2016. 472 p.
34. Hnatushenko V., Hnatushenko Vik. Recognition of High Dimensional Multi-Sensor Remote Sensing Data of Various Spatial Resolution. *IEEE Third International Conference on Data Stream Mining & Processing (DSMP)*. 21–25 August, 2020, Lviv, Ukraine. *Proceedings*. 2020. P. 262–265. <https://doi.org/10.1109/DSMP47368.2020.9204186>

35. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. Academic Press, 2007. 560 p. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-369407-2.X5000-1>
36. Maglione P. Very High Resolution Optical Satellites: An Overview of the Most Commonly used. *American Journal of Applied Sciences*. 2016. Vol. 13, No. 1. P. 91–99. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2016.91.99>
37. Каштан В. Ю., Гнатушенко В. В. Видалення тіней на цифрових космічних знімках на основі вейвлет-перетворення. *Системні Технології*. 2020. Т. 5 (130). С. 88–101. <https://doi.org/10.34185/1562-9945-5-130-2020-11>
38. Shedlovska Y. I. Computer technology of images geometric correction. *SWorldJornal*. 2020. Issue 6. Part 6. P. 47–52.
39. Cao J. S., Yuan X. X., Fang Y., Gong J. Y. Geometric Calibration of Ziyuan-3 Three-Line Cameras Using Ground Control Lines. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2016. Vol. 82, No.11. P. 893–902. <https://doi.org/10.14358/PERS.82.11.893>
40. Gupta R. P. Remote Sensing Geology. Berlin, Springer. 2018. 428p. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55876-8> (Last accessed 02.12.2020).
41. Станкевич С. А., Шкляр С. В., Лисенко А. Р. Програмний модуль оцінки субпіксельного зміщення знімків, отримуваних з квадрокоптеру. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2018. № 17. С. 10–13
42. Каштан В. Ю., Гнатушенко В. В. Дослідження ефективності методів злиття супутникових знімків високого просторового розрізнення. *Прикладні питання математичного моделювання*. 2020. Т. 3, № 2.1. URL: <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2020.3.2-1.11>
43. Hnatushenko V., Zhernovyi V. Complex Approach of High-Resolution Multispectral Data Engineering for Deep Neural Network Processing. *Proceedings 2020 International Scientific Conference "Intellectual Systems of Decision-making and Problems of Computational Intelligence"*, May 25–29, Zalisnyj Port, Ukraine. Springer, Cham. 2019. P. 659–672.

44. Amitrano, D., Guida, R., Ruello, G.: Multitemporal SAR RGB processing for Sentinel-1 GRD products: methodology and applications. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 12(5), 2019. 12(5). P. 1497–1507.
45. Hordiiuk D. M., Hnatushenko V. V. Neural network and local laplace filter methods applied to very high resolution remote sensing imagery in urban damage detection. *IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*. 17–20 October 2017, Lviv, Ukraine. Proceedings. 2017. P. 363–366. <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126648>
46. Hnatushenko V. V., Sierikova K. Y., Sierikov I. Y. Development of a Cloud-Based Web Geospatial Information System for Agricultural Monitoring Using Sentinel-2 Data. *IEEE 13th International Scientific and Technical Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*. 11–14 September 2018, Lviv, Ukraine. Proceedings. 2018. P. 270–273. URL: <https://doi.org/10.1109/STC-CSIT.2018.8526717>
47. Garkusha N., Hnatushenko V. Modeling the TOA Brightness Temperature on the SWIR-Sensors. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2018)*. 22–27 July 2018, Valencia, Spain. Proceedings. 2018. P. 4873–4876. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519287>
48. Tamta K., Bhadauria H. S., Bhadauria A. S. Object-Oriented Approach of Information Extraction from High Resolution Satellite Imagery. *IOSR Journal of Computer Engineering*. 2015. Vol. 17, Issue 3. P. 47–52. URL: <https://www.slideshare.net/iosrjce/objectoriented-approach-of-information-extraction-from-high-resolution-satellite-imagery> (Last accessed 05.12.2020).
49. Chang N.-B., Bai K. *Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing*. Boca Raton, Taylor & Francis Group, LLC CRC Press. 2018. 528 p. <https://doi.org/10.1201/9781315154602>
50. Jabari S., Zhang Y. Very High Resolution Satellite Image Classification Using Fuzzy Rule-Based Systems. *Algorithms*. 2013. No. 6. P. 762–781. <https://doi.org/10.3390/a6040762>

51. Long J., Shelhamer E., Darrell T. Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation. *28th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 7–12 June 2015, Boston, USA. Proceedings. 2015. P. 3431–3440. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298965>
52. Fu G. et al. Classification for High Resolution Remote Sensing Imagery Using a Fully Convolutional Network. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, Issue 5. P. 498. <https://doi.org/10.3390/rs9050498>
53. Maggiori E., Tarabalka Y., Charpiat G., Alliez P. Convolutional Neural Networks for Large-Scale Remote-Sensing Image Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2017. Vol. 55, Issue 2. P. 645–657. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2612821>
54. Maboudi M., Amini J., Malihi S., Hahn M. Integrating fuzzy object based image analysis and ant colony optimization for road extraction from remotely sensed images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. No. 138. P. 151–163. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.014>
55. Hnatushenko V. V., Mozgovoy D. K., Hnatushenko Vik. V., Spirintsev V. V., Udovyk I. M. All-weather monitoring of oil and gas production areas using satellite data. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. No. 7. P. 137–143. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-6/20>
56. Tzouvaras M., Kouhartsiouk D., Agapiou A., Danezis C., Hadjimitsis D. G. The Use of Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar Images and Open-Source Software for Cultural Heritage: An Example from Paphos Area in Cyprus for Mapping Landscape Changes after a 5.6 Magnitude Earthquake. *Remote Sens.* 2019. Vol. 11. 1766 (13 pages). <https://doi.org/10.3390/rs11151766>
57. Sharma P., Sharma R. A Review: Shadow Detection and its Removal in Images: A Review. *International Journal of Engineering Sciences*. 2016. Vol. 17. P. 558–561. URL: https://www.researchgate.net/publication/293695284_Shadow_Detection_and_its_Removal_in_Images_A_Review (Last accessed 05.12.2020).

58. Anoop S., Dhanya V., Kizhakkethottam J. J. Shadow Detection and Removal Using Tri-Class Based. *Procedia Technology*. 2016. Vol. 24. P. 1358–1365. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.148>
59. Garkusha I. Hnatushenko V. A Technology for Building a Seamless Mosaic Coverage of the Antarctica Coasts with Various-Time Images from Sentinel-1. *2020 IEEE 40th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, Kyiv, Ukraine. Proceedings. 2020, P. 747–750, doi: 10.1109/ELNANO50318.2020.9088909
60. Hordiiuk D., Oliinyk I., Hnatushenko V., Maksymov K. Semantic Segmentation for Ships Detection from Satellite Imagery. *IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 16–18 April 2019, Kyiv, Ukraine. Proceedings. 2019. P. 454–457. <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2019.8783822>
61. Xiao P., Zhang X., Zhang H., Hu R., Feng X. Multiscale Optimized Segmentation of Urban Green Cover in High Resolution Remote Sensing Image. *Remote Sens*. 2018. Vol. 10. 1813 (20 pages). <https://doi.org/10.3390/rs10111813>
62. Kothe U., Sagerer G., Posch S., Kummert F. Primary Image Segmentation. *17th Mustererkennung DAGM-Symposium*. 13-15 September 1995, Bielefeld, Germany. Proceedings. 1995. P. 554–561. https://doi.org/10.1007/978-3-642-79980-8_65
63. Златопольский А. А. Выделение на изображении однородных областей с неполными границами. *Исследование Земли из космоса*. 1985. №1. С. 94–102.
64. Hnatushenko V. V., Kogut P. I., Uvarov M. V. On optimal 2-d domain segmentation problem via piecewise smooth approximation of selective target mapping. *Journal of Optimization Differential Equations and their Applications*. 2019. Vol. 27, No. 2. P. 60–95. <https://doi.org/10.15421/141908>

65. Comaniciu D., Meer P. Mean Shift: A robust approach toward feature space analysis. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*. 2002. Vol. 24, No. 5. P. 603–619. <https://doi.org/10.1109/34.1000236>
66. Baatz M., Schape A. Multiresolution segmentation – an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung Symposium XII*, Salzburg, Austria. Proceedings. 2000. P. 12–13. URL: <https://pdf4pro.com/view/multiresolution-segmentation-an-optimization-approach-598443.html> (Last accessed 12.03.2020).
67. Chen Y., Chen Q., Jing C. Multi-resolution segmentation parameters optimization and evaluation for VHR remote sensing image based on mean NSQI and discrepancy measure. *Journal of Spatial Science*. 2019. <https://doi.org/10.1080/14498596.2019.1615011>
68. Макаров А. О., Старовойтов В. В. Быстрые алгоритмы вычисления признаков на цифровых изображениях. Минск, ОИПИ. 2005. 39 с. URL: https://www.researchgate.net/profile/Valery_Starovoitov/publication/236605178_Bystrye_algoritmy_vycislenia_priznakov_na_cifrovyyh_Izobrazeniah/links/0deec5183639ddbe48000000/Bystrye-algoritmy-vycislenia-priznakov-na-cifrovyyh-Izobrazeniah.pdf (Last accessed 03.04.2020).
69. Li W., Goodchild M. F., Church R. An efficient measure of compactness for two-dimensional shapes and its application in regionalization problems. *International Journal of Geographical Information Science*. 2013. Vol. 27. P. 1227–1250. <https://doi.org/10.1080/13658816.2012.752093>
70. Li W., Church R., Goodchild M. F. The p-compact-regions problem. *Geographical Analysis*. 2014. Vol. 46, Issue 3. P. 250–273. <https://doi.org/10.1111/gean.12038>
71. Li Xiaoxiao, Li Wenwen, Middel A., Harlan S. L., Brazel A. J., Turner B. L. Remote sensing of the surface urban heat island and land architecture in Phoenix, Arizona: Combined effects of land composition and configuration and

cadastral–demographic–economic factors. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 174. P. 233–243. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.022>

72. Freeman H., Shapira R. Determining the minimum-area encasing rectangle for an arbitrary closed curve. *Communications of the ACM*. 1975. Vol. 18, No. 7. P. 409–413. <https://doi.org/10.1145/360881.360919>

73. Kampker A., Sefati M., Rachman A. A., Kreisköther K., Campoy P. Towards Multi-Object Detection and Tracking in Urban Scenario under Uncertainties. *4th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*. 16–18 March 2018, Funchal, Madeira, Portugal. Proceedings. 2018. P. 156–167. <https://doi.org/10.5220/0006706101560167>

74. Jinru Xue, Baofeng Su. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*. 2017. Vol. 2017. 1353691 (17 pages). <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

75. Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. *Геоматика*. 2009. № 3. С. 28–32. https://sovzond.ru/upload/iblock/3b8/2009_03_005.pdf

76. McFeeters S. K. The use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*. 1996. No. 17. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>

77. Mustafa M. T., Hassoon K. I., Hussain H. M., Abd M. H. Using water indices (NDWI, MNDWI, NDMI, WRI AND AWEI) to detect physical and chemical parameters by apply remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Research*. 2017. Vol. 5, Issue 10. P. 117–128. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1040209>

78. Acharya T. D., Subedi A., Yang I. T., Lee D. H. Combining Water Indices for Water and Background Threshold in Landsat Image. *4th International Electronic Conference on Sensors and Applications*, 15–30 November 2017. Proceedings. 2018. Vol. 2. 143 (6 pages). <https://doi.org/10.3390/ecsa-4-04902>

79. Фраленко В. П. Методы текстурного анализа изображений, обработка данных дистанционного зондирования Земли. *Программные системы: теория и приложения*. 2014. №4 (22). С. 19–39.
80. Штовба С. Д. Классификация объектов на основе нечеткого логического вывода. *Математика в приложениях*. 2004. №1(5). С. 68–69.
81. De Souza Freitas V. L., Da Fonseca Reis B. M., Tommaselli A. M. G. Automatic shadow detection in aerial and terrestrial images. *Boletim de Ciências Geodésicas*. 2017. Vol. 23, No. 4. P. 578–590. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702017000400038>
82. Rossiter D. G. Technical note: statistical methods for accuracy assessment of classified thematic maps. 2004. 46 p. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.77.247&rep=rep1&type=pdf> (Last accessed 03.02.2020).
83. Cohen J. Weighted kappa: Nominal scale agreement with provision for scaled disagreement or partial credit. *Psychological Bulletin*. 1968. Vol. 70. P. 426–443. <https://doi.org/10.1037/h0026256>
84. Liasis G., Stavrou S. Satellite images analysis for shadow detection and building height estimation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 119. P. 437–450. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.07.006>
85. Deilami B. R., Ahmad B. B., Saffar M. R. A., Umar H. Z. Review of Change Detection Techniques from Remotely Sensed Images. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*. 2015. Vol. 10, No. 2. P. 221–229.
86. Sah A. K., Sah B. P., Honji K., Kubo N., Senthil S. Semi-automated cloud/shadow removal and land cover change detection using satellite imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2012. Vol. XXXIX-B7. P. 335–340. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B7-335-2012>
87. Singh N., Maxton A. A. Detection of Clouds and Cloud Shadow in Satellite Images using Fuzzy Logic. *International Journal of Advanced Research*

in *Computer Engineering & Technology (IJARCET)*. 2014. Vol.3, Issue 4. P. 1225–1228.

88. Sabri A., Siham A., Abdellah A. A multiscale based approach for automatic shadow detection and removal in natural images. *Multimedia Tools and Applications. Multimedia Tools and Applications*. 2019. Vol.78, Issue 9. P. 11263–11275. <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6678-x>

89. Shah S., Gamit N. A Survey on Various Shadow Detection Methods. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2015. Vol. 5, No. 2. P. 509–512. https://doi.org/10.1007/978-3-030-37218-7_45

90. Panchal M. H., Gamit N. C. A comprehensive survey on shadow detection techniques. *International Conference on Wireless Communications, Signal Processing and Networking (WiSPNET)*. 23-25 March 2016, Chennai, India. Proceedings. 2016. P. 2249–2253. <https://doi.org/10.1109/WiSPNET.2016.7566542>

91. Chondagar V., Pandya H., Panchal M., Patel R., Sevak D., Jani K. A Review: Shadow Detection and Removal. *International Journal of Computer Science and Information Technologies (IJCSIT)*. 2015. Vol. 6, No. 6. P. 5536–5541. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2818.0242>

92. Afzal F., Kareem A. Shadow Detection and Reconstruction in Satellite Images. *International Journal of Advance Research in Computer Science and Management Studies*. 2015. Vol. 3, No. 5. P. 407–414.

93. Azevedo S. C., Silva E. A, Pedrosa M. M. Shadow detection improvement using spectral indices and morphological operators in urban areas in high resolution images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. XL-7/W3. P. 587–592. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-587-2015>

94. Blajovici C., Kiss P. J., Bonus Z., Varga L. Shadow detection and removal from a single image. 2011. 6 p. URL: http://www.inf.u-szeged.hu/projectdirs/ssip2011/teamF/ShadowRemoval/Documentation/Shadow%

20detection%20and%20removal%20from%20a%20single%20image.pdf (Last accessed 11.11.2020).

95. Tsai Victor J. D. A comparative study on shadow compensation of color aerial images in invariant color models. *IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing*. 2006. Vol. 44, No 6. P. 1661–1671. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.869980>

96. Shao Q., Xu C., Zhou Y., Dong H. Cast shadow detection based on the YCbCr color space and topological cuts. *The Journal of Supercomputing*. 2020. Vol. 76. P. 3308–3326. <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2558-4>

97. Singh K. K., Pal K., Nigam M. J. Shadow detection and removal from remote sensing images using NDI and morphological operators. *International Journal of Computer Applications*. 2012. Vol. 42, No. 10. P. 37–40. <https://doi.org/10.5120/5731-7805>

98. Polidorio A. M., Flores F. C., Imai N. N., Tommaselli A. M. G., Franco C. Automatic shadow segmentation in aerial color images. *XVI Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image Processing*. 12–15 October 2003, Sao Carlos, Brazil. Proceedings. 2003. P. 270–277. <https://doi.org/10.1109/SIBGRA.2003.1241019>

99. Huang J., Xie W., Tang L. Detection of and compensation for shadows in colored urban aerial images. *Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation*. 15–19 June 2004, Hangzhou, China. Proceedings. 2004. P. 3098–3100. <https://doi.org/10.1109/WCICA.2004.1343090>

100. Xiao C., Xiao D., Zhang L., Chen L. Efficient shadow removal using subregion matching illumination transfer. *Computer Graphics Forum*. 2013. Vol. 32, No 7. P. 421–430. <https://doi.org/10.1111/cgf.12250>

101. Rufenacht D., Fredembach C., Susstrunk S. Automatic and accurate shadow detection using near-infrared information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2014. Vol. 36, No. 8. P. 1672–1678. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2013.229>

102. Kadhim N. M. S. M., Mourshed M., Bray M. T. Shadow detection from very high resolution satellite image using GrabCut segmentation and ratio-band algorithms. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2015. Vol. XL-3/W2. P. 95–101. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-3-W2-95-2015>
103. Shahi K., M. Shafri H. Z., Taherzadeh E. A novel spectral index for automatic shadow detection in urban mapping based on WorldView-2 satellite imagery. *International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering*. 2014. Vol. 8, No. 10. P. 1685–1688.
104. Mostafa Y., Abdelhafiz A. Accurate shadow detection from high-resolution satellite images. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017. Vol. 12, No. 4. P. 494–498. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2017.2650996>
105. Gurav G., Limkar M. B., Hundiwale S. M. Study of Different Shadow Detection and Removal Algorithm. *International Journal of Research in Electronics and Communication Technology (IJRECT 2014)*. 2014. Vol. 1, Issue 2. P. 26–29.
106. Guo R., Dai Q., Hoiem D. Single-image shadow detection and removal using paired regions. *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2011)*. 20–25 June 2011, Colorado Springs, USA. Proceedings. 2011. P. 2033–2040. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2011.5995725>
107. Tiwari S., Chauhan K., Kurmi Y. Shadow detection and compensation in aerial images using MATLAB. *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol. 119, No. 20. P. 5–9. <https://doi.org/10.5120/21181-4230>
108. Otsu N. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1979. Vol. 9, No. 1. P. 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
109. Pratomo J., Kuffer M., Martinez J., Kohli D. Coupling Uncertainties with Accuracy Assessment in Object-Based Slum Detections, Case Study: Jakarta, Indonesia. *Remote Sensing*. 2017. Vol. 9, Issue 11. 1164 (17 pages). <https://doi.org/10.3390/rs9111164>

110. Tayara H., Chong K. T. Object Detection in Very High-Resolution Aerial Images Using One-Stage Densely Connected Feature Pyramid Network. *Sensors*. 2018. Vol. 18. 3341 (18 pages). <https://doi.org/10.3390/s18103341>
111. Powers D. M. W. Evaluation: from precision, recall and F-measure to roc, informedness, markedness & correlation. *Journal of Machine Learning Technologies*. 2011. Vol. 2, Issue 1. P. 37–63.
112. Rahman Md. A., Wang Y. Optimizing Intersection-Over-Union in Deep Neural Networks for Image Segmentation. *12th International Symposium on Visual Computing*. 12–14 December 2016, Las Vegas, Nevada, USA. Proceedings. 2016. P. 234–244.
113. Shor Y., Lischinski D. The shadow meets the mask: pyramid-based shadow removal. *Computer Graphics Forum*. 2008. Vol. 27, No. 2. P. 577–586.
114. Afreen S. S., Sujatha A. A method of shadow detection and shadow removal for high resolution remote sensing images. *International Journal of Advanced Technology and Innovative Research*. 2015. Vol. 7, No. 7. P. 1125–1133. <https://doi.org/10.17148/IJARCCE.2015.4229>
115. Murali S., Govindan V. K., Kalady S. A Survey on Shadow Detection Techniques in a Single Image. *Journal of Information Technology and Control*. 2018. Vol. 47, No. 1. P. 75–92 <https://doi.org/10.5755/j01.itc.47.1.15012>
116. Jagalingam P., Hegde A. V. A Review of Quality Metrics for Fused Image. *Aquatic Procedia*. 2015. Vol. 4. P. 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.aqpro.2015.02.019>
117. Panchal S., Thakker R. Implementation and comparative quantitative assessment of different multispectral image pansharpening approaches. *Signal & Image Processing: An International Journal*. 2015. Vol. 6, No. 5. P. 35–48. <https://doi.org/10.5121/sipij.2015.6503>
118. Babapour H., Mokhtarzade M., Zoj M. A. Novel Post-Calibration Method for Digital Cameras Using Image Linear Features. *International Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 38, No. 8–10. P. 2698–2716. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1232875>

119. Kim J., Kim T., Shin D., Kim S. Fast and Robust Geometric Correction for Mosaicking UAV Images with Narrow Overlaps. *International Journal of Remote Sensing*. 2017. Vol 37. No. 8–10. P. 2557–2576. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1294779>
120. Hao Fang, Binlin Hu, Zhongjiang Yu, Huoxi Xu, Chuan He, Aihua Li & Yinnian Liu Semi-automatic geometric correction of airborne hyperspectral push-broom images using ground control points and linear features. *International journal of remote sensing*. 2018. Vol. 39, No. 12. P. 4115–4129. URL: <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1455237>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ 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. Індукується 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. Індукується 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. Індукується у Index Copernicus, Google Scholar*).

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. Днепрпетровск, 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 тіні 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 [Електронний ресурс]: *XVIII Международная научно-практическая конференция «Человек и космос»*, 6–8 апреля 2016. Днепропетровск, Украина. Сборник тезисов. 2016. С. 363. 1 електрон.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 фотограмметричних 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 електрон.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. **Shedlovska 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. **Shedlovska 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.

ДОДАТОК Б
ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор
 ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС
 УКРАЇНА»


 «10» 12 2018 р. **В.О. Пархоменко**



А К Т

впровадження наукових результатів дисертаційної роботи
 аспіранта кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
 Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
 Шедловської Яни Ігорівни
**«Дешифрування та аналіз багатовимірних фотограмметричних зображень
 високого просторового розрізнення»**

Комісія у складі:

Голова комісії — Гаркуша І.М., кандидат технічних наук, Scientist TL



Члени комісії — Мозговий Д.К., кандидат технічних наук, ГІС-аналітик
 Храмов Д.О., кандидат технічних наук, ГІС-аналітик

склала цей акт у тому, що результати досліджень, виконаних у кандидатській дисертації Шедловської Я.І., використані у практиці робіт ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» (м. Дніпро) при обробці фотограмметричних багатоспектральних зображень високого просторового розрізнення, зокрема одержаних з космічних апаратів «Worldview».

Запропоновані у дисертації ефективні методи і алгоритми дешифрування, аналізу та комп'ютерної візуалізації цифрових даних, а також розроблене на їх основі програмне забезпечення дозволяють в автоматизованому режимі розпізнавати об'єкти на основі об'єктно-орієнтованого підходу та ідентифікації тіней з мінімальними витратами обчислювальних ресурсів і часу. Розроблені Я.І. Шедловською програмні модулі використовуються в системах розпізнавання фотограмметричних зображень, що дозволяє значно підвищити ефективність автоматизованого аналізу аерокосмічних зображень високого та надвисокого просторового розрізнення.

Голова комісії

Члени комісії

 І.М. Гаркуша
 Д.К. Мозговий
 Д.О. Храмов

ЗАТВЕРДЖУЮ
Начальник «Дніпрокосмос»
філії Національного центру
управління та випробувань
космічних засобів Державного
космічного Агентства України



В.В. Кавац

15 грудня 2020 р.

А К Т

про впровадження наукових результатів дисертаційної роботи
 Шедловської Яни Ігорівни
 «ДЕШИФРУВАННЯ ТА АНАЛІЗ БАГАТОВИМІРНИХ
 ФОТОГРАММЕТРИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ВИСОКОЇ ПРОСТОРОВОЇ
 РОЗРІЗНЕНОСТІ»,

поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
 за спеціальністю 05.01.01 – Прикладна геометрія, інженерна графіка

Результати досліджень, виконаних у кандидатській дисертації Я.І. Шедловської, використані у практиці робіт «Дніпрокосмос» філії Національного центру управління та випробувань космічних засобів при розробці методик і технологій автоматизованого оброблення інформації дистанційного зондування Землі для вирішення тематичних задач.

Запропонований в дисертації новий алгоритм дешифрування супутникових зображень високої просторової розрізненості на основі об'єктно-орієнтованого підходу дозволяє отримати класифіковане зображення земної поверхні та виділити на ній різні типи об'єктів. Я.І. Шедловською запропоновано та обґрунтовано підхід до вибору методу сегментації зображень високої просторової розрізненості, зокрема отриманих супутниками серії WorldView, що дозволило значно підвищити достовірність подальшого розпізнавання об'єктів. Крім того, розвинутий авторкою метод геометричної корекції викривлень аерокосмічних зображень високої просторової розрізненості, отриманих поздовжніми ПЗЗ-сканерами, дозволив покращити точність та швидкість попередньої обробки багатоканальних зображень.

ДОДАТОК В

ФРАГМЕНТИ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ

Пошук зв'язних компонент на сегментованому зображенні та покращення сегментації:

x – сегментоване зображення, $iz2$ – оригінальне зображення

```
sz=size(x);  xs=zeros(sz(1),sz(2));  xm=zeros(sz(1),sz(2));  k=0;  %%%
```

```
iz2(:, :, 1)=iz22(:, :, 5);  iz2(:, :, 2)=iz22(:, :, 3);  iz2(:, :, 3)=iz22(:, :, 2);
```

```
for i=2:1:sz(1)-1
```

```
for j=2:1:sz(2)-1
```

```
    if xs(i,j)==0
```

```
        k=k+1;  xs(i,j)=k;  xm(i,j)=k;  kk=k;
```

```
        while kk(1)~=0;
```

```
            [f1,f2]=find(xm~=0);  kk=size(f1);
```

```
            xm=zeros(sz(1),sz(2));
```

```
            for ii=1:size(f1)
```

```
                if (x(f1(ii),f2(ii),1)==x(f1(ii)-1,f2(ii),1))&(x(f1(ii),f2(ii),2)==x(f1(ii)-1,f2(ii),2))&(x(f1(ii),f2(ii),3)==x(f1(ii)-1,f2(ii),3))&(xs(f1(ii)-1,f2(ii))==0)
```

```
                    xs(f1(ii)-1,f2(ii))=k;  xm(f1(ii)-1,f2(ii))=k;
```

```
                if ((f1(ii)-1)==1) | ((f1(ii)-1)==sz(1)) | (f2(ii)==1) | (f2(ii)==sz(2))
```

```
                    xm(f1(ii)-1,f2(ii))=0;  end;  end;
```

```
            if
```

```
(x(f1(ii),f2(ii),1)==x(f1(ii),f2(ii)+1,1))&(x(f1(ii),f2(ii),2)==x(f1(ii),f2(ii)+1,2))&(x(f1(ii),f2(ii),3)==x(f1(ii),f2(ii)+1,3))&(xs(f1(ii),f2(ii)+1)==0)
```

```
                xs(f1(ii),f2(ii)+1)=k;  xm(f1(ii),f2(ii)+1)=k;
```

```
                if ((f2(ii)+1)==1) | ((f2(ii)+1)==sz(2)) | (f1(ii)==1) | (f1(ii)==sz(1))
```

```
                    xm(f1(ii),f2(ii)+1)=0;  end;  end;
```

```
                if (x(f1(ii),f2(ii),1)==x(f1(ii)+1,f2(ii),1))&
```

```
(x(f1(ii),f2(ii),2)==x(f1(ii)+1,f2(ii),2))&(x(f1(ii),f2(ii),3)==x(f1(ii)+1,f2(ii),3))&(xs(f1(ii)+1,f2(ii))==0)
```

```
                    xs(f1(ii)+1,f2(ii))=k;  xm(f1(ii)+1,f2(ii))=k;
```

```
                if ((f1(ii)+1)==1) | ((f1(ii)+1)==sz(1)) | (f2(ii)==1) | (f2(ii)==sz(2))
```

```

xm(f1(ii)+1,f2(ii))=0; end; end;
if (x(f1(ii),f2(ii),1)==x(f1(ii),f2(ii)-1,1))&(x(f1(ii),f2(ii),2)==x(f1(ii),f2(ii)-
1,2))&(x(f1(ii),f2(ii),3)==x(f1(ii),f2(ii)-1,3))& (xs(f1(ii),f2(ii)-1)==0)
xs(f1(ii),f2(ii)-1)=k; xm(f1(ii),f2(ii)-1)=k;
if ((f2(ii)-1)==1)|((f2(ii)-1)==sz(2))|(f1(ii)==1)|(f1(ii)==sz(1))
xm(f1(ii),f2(ii)-1)=0; end; end;
end; end; end; end; end;
% xs – зв’язні компоненти зображення, k – кількість зв’язних областей;
k2=k;

```

Перетворення зображення з кольорової моделі RGB в кольорову модель HSV:

```

x=double(iz2); sz=size(x);
RGB(:,:,1)=x(:,:,1); RGB(:,:,2)=x(:,:,2); RGB(:,:,3)=x(:,:,3);
R=x(:,:,1); G=x(:,:,2); B=x(:,:,3);
R=double(R); G=double(G); B=double(B);
H=zeros(sz(1),sz(2)); S=zeros(sz(1),sz(2)); V=zeros(sz(1),sz(2));
Cmin=zeros(sz(1),sz(2)); Cmax=zeros(sz(1),sz(2)); de=zeros(sz(1),sz(2));
Rn=zeros(sz(1),sz(2)); Gn=zeros(sz(1),sz(2)); Bn=zeros(sz(1),sz(2));
Rn=R./255; Gn=G./255; Bn=B./255;
for i=1:1:sz(1)
for j=1:1:sz(2)
ar=[Rn(i,j),Gn(i,j),Bn(i,j)];
Cmax(i,j)=max(ar); Cmin(i,j)=min(ar); de(i,j)=Cmax(i,j)-Cmin(i,j);
if Cmax(i,j)==ar(1) H(i,j)=60*mod(((Gn(i,j)-Bn(i,j))/de(i,j)),6); end;
if Cmax(i,j)==ar(2) H(i,j)=60*((Bn(i,j)-Rn(i,j))/de(i,j)+2); end;
if Cmax(i,j)==ar(3) H(i,j)=60*((Rn(i,j)-Gn(i,j))/de(i,j)+4); end;
if de(i,j)==0 H(i,j)=0; end;
V(i,j)=Cmax(i,j);
if Cmax(i,j)==0 S(i,j)=0; end;
if Cmax(i,j)~=0 S(i,j)=de(i,j)/Cmax(i,j); end;
end; end;

```

Розрахунок середніх значень та скв для зображення у кольорових моделях RGB, HSV, індексу NDVI, індексу NDWI:

ndwi – індекс NDWI, ndvi – індекс NDVI

```
x=double(iz2);
```

```
M=zeros(k,8);    SKV= zeros(k,3);    i=0; j=0; u1=0; u2=0; szu=0; M1=0; M2=0; M3=0; MH=0;
MS=0;
```

```
MV=0; Mn=0; MM1=0; MM2=0; MM3=0; Mnw=0;
```

```
for i=1:1:k
```

```
[u1,u2]=find(xs==i);    szu=size(u1);    M1=0; M2=0; M3=0; MM1=0; MM2=0; MM3=0; MH=0;
MS=0;
```

```
MV=0; Mn=0; Mnw=0;
```

```
    for j=1:1:szu(1)
```

```
        M1=M1+x(u1(j),u2(j),1);    M2=M2+x(u1(j),u2(j),2);    M3=M3+x(u1(j),u2(j),3);
```

```
        MH=MH+H(u1(j),u2(j)); MS=MS+S(u1(j),u2(j)); MV=MV+V(u1(j),u2(j));
```

```
        Mn=Mn+ndvi(u1(j),u2(j));    Mnw=Mnw+ndwi(u1(j),u2(j));
```

```
        MM1=MM1+x(u1(j),u2(j),1)^2;    MM2=MM2+x(u1(j),u2(j),2)^2;
```

```
    MM3=MM3+x(u1(j),u2(j),3)^2;
```

```
    end;
```

```
M(i,1)=M1/szu(1); M(i,2)=M2/szu(1); M(i,3)=M3/szu(1); M(i,4)=MH/szu(1); M(i,5)=MS/szu(1);
```

```
M(i,6)=MV/szu(1); M(i,7)=Mn/szu(1); M(i,8)=(M(i,5)-M(i,6))/(M(i,5)+M(i,6));
```

```
M(i,9)=Mnw/szu(1);
```

```
SKV(i,1)=sqrt((MM1/szu(1))-(M1/szu(1))^2); SKV(i,2)=sqrt((MM2/szu(1))-(M2/szu(1))^2);
```

```
SKV(i,3)=sqrt((MM3/szu(1))-(M3/szu(1))^2);
```

```
end;
```

Розрахунок властивостей сегментів зображення:

```
featuresar={'1size', '2borderlen', '3rectfit', '4Cmp', '5objarea/minboundarea', '6length', '7width', '8
wdth/length', '9bordergrad', '10bord/area'};
```

```
neighborhood=zeros(k,k);    xsbord=zeros(sz(1),sz(2));    features=zeros(k,9);
```

```
u1=0; u2=0;
```

```
xs1=zeros(sz(1)+2,sz(2)+2);    xs1(2:sz(1)+1,2:sz(2)+1)=xs;    %%% добавим нули
```

```
xsbord1=zeros(sz(1)+2,sz(2)+2);
```

```
for i=1:1:k
```

```

[u1,u2]=find(xs1==i);    szu=size(u1);    features(i,1)=szu(1);
    for j=1:1:szu(1)
        for ii=(u1(j)-1):1:(u1(j)+1)
            for mm=(u2(j)-1):1:(u2(j)+1)
                if (xs1(u1(j),u2(j))~=xs1(ii,mm))&(xs1(ii,mm)~=0)
                    neighborhood(xs1(u1(j),u2(j)), xs1(ii,mm))=neighborhood(xs1(u1(j),u2(j)), xs1(ii,mm))+1;
                    xsbord1(u1(j),u2(j))=1;    end;
                end; end; end;
end;
xsbord=xsbord1(2:(sz(1)+1),2:(sz(2)+1));

for i=1:1:k
[u1, u2]=find(xs==i);    szu=size(u1);    num1=0;    num2=0;
for j=1:1:szu
if xsbord(u1(j),u2(j))==1,    num1=num1+xgr(u1(j),u2(j));    num2=num2+1;
end;    end;
    features(i,2)=num2;
features(i,9)=num1/num2;    features(i,10)=features(i,2)/features(i,1);
end;

coordr=zeros(5,2,k);
for i=1:1:k
[u1,u2]=find(xs==i);    szu=size(u1);
if szu(1)>5
DT = delaunayTriangulation(u1,u2);
[C,v] = convexHull(DT);
[rectx,recty,areaaa,perimetr] = minboundrect(u1,u2);
coordr(1:5,1,i)=rectx;    coordr(1:5,2,i)=recty;
%rectxf=floor(rectx);    rectyf=floor(recty);
features(i,4)=(4*pi*features(i,1))/(features(i,2)^2);
features(i,5)=features(i,1)/v;
d=zeros(2,1);    d(1,1)=sqrt((rectx(1)-rectx(2))^2+(recty(1)-recty(2))^2);
d(2,1)=sqrt((rectx(2)-rectx(3))^2+(recty(2)-recty(3))^2);

```

```

features(i,6)=max(d);  features(i,7)=min(d);  features(i,8)=features(i,7)/features(i,6);
features(i,3)=features(i,1)/(features(i,6)*features(i,7));
    end;
end;

```

Компенсація тіні:

x – зображення, mask – бінарна маска тіні

```
sz=size(x1);  x=zeros(sz(1),sz(2),3);  xx=x;
```

```
x=double(x);
```

```
ks1=0; kl1=0; shadms1=0; lighms1=0; ks2=0; kl2=0; shadms2=0; lighms2=0;
```

```
ks3=0; kl3=0; shadms3=0; lighms3=0;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms1=shadms1+x(i,j,1); ks1=ks1+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms1=lighms1+x(i,j,1); kl1=kl1+1; end;
```

```
end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms2=shadms2+x(i,j,2); ks2=ks2+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms2=lighms2+x(i,j,2); kl2=kl2+1; end;
```

```
end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms3=shadms3+x(i,j,3); ks3=ks3+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms3=lighms3+x(i,j,3); kl3=kl3+1; end;
```

```
end; end;
```

```
MI1=lighms1/kl1; MI2=lighms2/kl2; MI3=lighms3/kl3;
```

```
Ms1=shadms1/ks1; Ms2=shadms2/ks2; Ms3=shadms3/ks3;
```

```
ks1=0; kl1=0; shadms1=0; lighms1=0; ks2=0; kl2=0; shadms2=0; lighms2=0;
```

```
ks3=0; kl3=0; shadms3=0; lighms3=0;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms1=shadms1+(x(i,j,1)-Ms1)^2; ks1=ks1+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms1=lighms1+(x(i,j,1)-MI1)^2; kl1=kl1+1; end;
```

```
end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms2=shadms2+(x(i,j,2)-Ms2)^2; ks2=ks2+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms2=lighms2+(x(i,j,2)-MI2)^2; kl2=kl2+1; end;
```

```
end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
shadms3=shadms3+(x(i,j,3)-Ms3)^2; ks3=ks3+1; end;
```

```
if mask(i,j)==0
```

```
lighms3=lighms3+(x(i,j,3)-MI3)^2; kl3=kl3+1; end;
```

```
end; end;
```

```
SI1=sqrt(lighms1/kl1); SI2=sqrt(lighms2/kl2); SI3=sqrt(lighms3/kl3);
```

```
Ss1=sqrt(shadms1/ks1); Ss2=sqrt(shadms2/ks2); Ss3=sqrt(shadms3/ks3);
```

```
matr=zeros(sz(1),sz(2),3);
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
matr(i,j,1)=MI1-Ms1*( SI1/Ss1)+(SI1/Ss1)*x(i,j,1);
```

```
else matr(i,j,1)=x(i,j,1);
```

```
end; end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
matr(i,j,2)=Ml2-Ms2*( Sl2/Ss2)+(Sl2/Ss2)*x(i,j,2);
```

```
else matr(i,j,2)=x(i,j,2);
```

```
end; end; end;
```

```
for i=1:1:sz(1)
```

```
for j=1:1:sz(2)
```

```
if mask(i,j)==255
```

```
matr(i,j,3)=Ml3-Ms3*( Sl3/Ss3)+(Sl3/Ss3)*x(i,j,3);
```

```
else matr(i,j,3)=x(i,j,3);
```

```
end; end; end;
```

```
matr=uint8(matr);      % результат
```