

**ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ОЛЕСЯ ГОНЧАРА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ІНСТИТУТ КОСМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНЕ КОСМІЧНЕ АГЕНТСТВО УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВАСИЛЬЄВ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ



Прим. №__

УДК 528.8

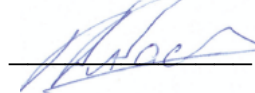
**ДИСЕРТАЦІЯ
РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ХМАРНОЇ ОБРОБКИ
БАГАТОВИМІРНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ**

05.07.12 – Дистанційні аерокосмічні дослідження

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



В.В. Васильєв

Науковий керівник **Гнатушенко Володимир Володимирович**,
доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2019

АНОТАЦІЯ

Васильєв В.В. Розробка інформаційних систем хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 «Дистанційні аерокосмічні дослідження». (05 – Технічні науки). – Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України, Київ, 2019.

У дисертаційній роботі розв’язана важлива науково-прикладна задача розробки нових методів і автоматизованих інформаційних технологій і систем попередньої і тематичної обробки різномірних супутникових даних на базі хмарної архітектури, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс). Розроблено автоматизовану інформаційну технологію (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних на основі злиття даних та продуктів їх обробки з різних джерел. Запропоновані архітектурні і технічні рішення швидкого доступу та тематичної обробки супутникових даних, що зберігаються у хмарному середовищі. Розроблені методи та інформаційні технології реалізовані у вигляді геопросторового Web-сервісу LandViewer, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс) та має 200 тис. зареєстрованих користувачів.

Створені методи та інформаційні технології дозволяють підвищити деталізацію об’єктів, розпізнавати рослинність і водойми на території мегаполісів, будувати карти вологості ґрунтів, проводити моніторинг і оцінки багаторічних посух та антропогенних процесів, проводити оцінку наслідків вирубок та пожеж лісових масивів, моніторинг незаконного видобутку бурштину, здійснювати моніторинг агротехнічних операцій на основі інтерферометричного аналізу радарних даних та моніторинг якості повітря у міських районах.

Розроблена система хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних забезпечує виконання задач супутникового моніторингу в реальному часі та їх масштабування на великі території без збільшення часу розв'язання задач.

Ключові слова: геопросторові дані, супутникові зображення, хмарна обробка, архітектура, Web-сервіс, моніторинг, методи обробки, часові ряди.

ABSTRACT

Vasyliiev V.V. Information Systems Development for Cloud Processing of Multidimensional Geospatial Data. — Manuscript.

Thesis for scientific degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.07.12 — «Remote Aerospace Research». (05 – Technical Sciences). – Oles Honchar Dnipro National University, Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine, Kyiv, 2019.

The thesis deals with the important scientific and applied problem of development of new methods and systems and automated information technologies of preliminary and thematic processing of heterogeneous satellite data on the basis of cloud architecture, based on the PaaS service model (platform as a service). Automated information technology (workflow) for satellite data pre-processing has been developed based on the data and their processing products from different sources fusion. Architectural and technical solutions for fast access and thematic processing of satellite data stored in the cloud are offered. The developed methods and information technologies are implemented in the form of geospatial Web service LandViewer, which is based on the PaaS (platform as a service) model and has 200 thousand registered users.

The created methods and information technologies allow to increase the objects detail, vegetation and water bodies in metropolitan areas identification, soil moisture maps building, provide monitoring and evaluation of: drought years and anthropogenic processes, illegal deforestation and wildfires, illegal amber production, agrotechnical operations on the basis of radar data interferometric analysis and urban area air quality.

The developed cloud-based system for multidimensional geospatial data processing enables real-time satellite monitoring tasks to be performed and scaled to large areas without increasing task solving time.

Keywords: geospatial data, satellite imagery, cloud processing, architecture, Web service, monitoring, processing methods, time series.

АННОТАЦИЯ

Васильев В.В. Разработка информационных систем облачной обработки многомерных геопространственных данных. - Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.12 «Дистанционные аэрокосмические исследования». (05 — Технические науки). — Днепропетровский национальный университет имени Олеся Гончара, Институт космических исследований НАН Украины та ГКА Украины, Киев, 2019.

В диссертационной работе решена важная научно-прикладная задача разработки новых методов и автоматизированных информационных технологий и систем предварительной и тематической обработки разнородных спутниковых данных на базе облачной архитектуры, основанной на модели обслуживания PaaS (платформа как сервис).

Усовершенствован метод и разработана автоматизированная информационная технология (воркфлоу) предварительной обработки спутниковых данных на основе слияния данных и продуктов их обработки из различных источников. В отличие от известных алгоритмов, разработанный воркфлоу является робастным и обеспечивает возможность решения широкого класса прикладных задач на основе унифицированных данных уровня L2, поскольку включает полный перечень возможных этапов предварительной обработки спутниковых данных, включая удаление облаков и коррекцию рельефа, а также применим для всех известных на сегодня спутников.

Усовершенствован метод повышения информативности и детализации объектов на многоканальных спутниковых снимках на основе ИСА и вейвлет-преобразования и слияния с панхроматическим каналом, в отличие от известных ранее преобразований мультиспектральных каналов. Предлагаемый метод применим ко всем известным на сегодня оптическим данным высокого разрешения

и позволяет повысить пространственное разрешение изображения путем слияния разнородных данных.

Получила дальнейшее развитие методология определения эффективности методов обработки спутниковых многоканальных изображений. Предложен критерий определения эффективности метода повышения информативности многоспектральных изображений на основе вейвлет-преобразования в виде энтропии яркостей. Показано, что с использованием разработанного метода информативность повышается примерно на 20%.

Разработана информационная система облачной обработки временных рядов многомерных геопространственных данных высокого и сверхвысокого разрешения. Предложенные архитектурные и технические решения доступа, предварительной и тематической обработки спутниковых данных, хранящихся в облачной среде. Впервые разработана информационная технология хранения и обработки спутниковых данных, оптимизированная для использования в облачной среде.

Разработанные методы и информационные технологии реализованы в виде геопространственного Web-сервиса LandViewer, основанного на модели обслуживания PaaS (платформа как сервис). Web сервис развернут в различных геолокациях для максимальной скорости передачи данных и отказоустойчивости и положен в основу систем спутникового мониторинга и методов предварительной и тематической обработки многомерных геопространственных данных. Предложенные решения предварительной и тематической обработки позволяют повысить детализацию объектов с последующим распознаванием растительности и водоемов на территории мегаполисов, строить карты влажности почв, проводить мониторинг и оценку ущерба от многолетних засух и антропогенных процессов, проводить оценку последствий вырубок и пожаров лесных массивов, мониторинг незаконной добычи янтаря, проводить мониторинг агротехнических операций на основе когерентного анализа радарных данных, и определять влияние атмосферы по радиолокационным данным, проводить мониторинг качества воздуха в городских районах.

Предложенная архитектура облачной обработки многомерных геопространственных данных обеспечивает выполнение задач спутникового мониторинга в реальном времени и их масштабирование на большие территории без увеличения времени решения задач.

Ключевые слова: геопространственные данные, спутниковые изображения, облачная обработка, архитектура, Web-сервис, мониторинг, методы обработки, временные ряды.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Hnatushenko V.V, Hnatushenko Vik.V., Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.** Satellite technology of the forest fires effects monitoring. *Scientific bulletin of National Mining University. — State Higher Educational Institution «National Mining University».* Dnipropetrovsk. 2016. No.1 (151). P. 70–76.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: аналіз існуючих ГІС-технологій, методів оцінки наслідків лісових пожеж)

2. Hnatushenko V.V., Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Kavats O.O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Scientific bulletin of National Mining University. - State Higher Educational Institution «National Mining University».* Dnipro. 2017. No.2 (158). P. 99–105.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія моніторингу незаконного видобутку бурштину в Україні за даними ДЗЗ)

3. 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.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія оцінки наслідків вирубок лісових масивів за даними ДЗЗ на базі хмарної платформи)

4. Kussul N., Lavreniuk M., Sumilo L., Kolotii A., Rakoid O., Yailymov B., Shelestov A., **Vasiliiev 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.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: воркфлоу моніторингу цілей сталого розвитку в хмарному середовищі)

5. Shelestov A., Sumilo L., Lavreniuk M., **Vasiliiev 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, 836. P. 134–145.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи)

6. 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*. 2019, doi:10.1109/tbdata.2019.2940237.

(Індексується у Scopus. Журнал віднесено до першого квартиля (Q1). Особистий внесок: архітектура хмарної системи обробки часових рядів супутникових даних)

7. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса Landsat Viewer. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т. 24. Вип.19. С. 95–101.

(Особистий внесок: автоматизація методології моніторингу антропогенних процесів за багатоканальними супутниковими зображеннями у хмарному Web – сервісі)

8. Mozgovoy D.K., Serikov I.Ju., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V. V. Automatic vegetation classification using multispectral aerial images and neural network. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»*. Дніпро. 2016. №6 (107). С. 66-72.

(Особистий внесок: автоматизація методу розпізнавання і класифікації рослинності на багатоспектральних аерознімках з використанням нейронної мережі)

Роботи, що додатково відображають наукові результати дисертації:

9. **Васильев В.В.**, Мозговой Д.К. Анализ многолетней засухи по данным Landsat 8. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т. 24. Вип.19. С.79-89.

(Особистий внесок: Web-архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних)

10. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Оценка последствий лесных пожаров по данным ДЗЗ. *Інформаційні системи, механіка та керування*. № 14 (2016). С. 42–52.

(Особистий внесок: автоматизація воркфлоу ідентифікації та оцінки зон ураження територій лісових масивів за різночасовими багатоканальними супутниковими зображеннями)

11. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Мониторинг вырубок лесов по космоснимкам. *Механіка гіроскопічних систем*. №31 (2016). С. 75–86.

(Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія моніторингу вирубок лісових масивів)

Роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Hnatushenko V.V., **Vasyliiev V.V.** Remote sensing image fusion using ICA and optimized wavelet transform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLI-B7. 2016. XXIII ISPRS Congress. 12–19 July 2016. Prague, Czech Republic. P. 653-659.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод підвищення деталізації об'єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ICA та оптимізованого вейвлет-перетворення)

13. Hnatushenko V.V., Garkusha I. N., **Vasyliiev V.V.** Creating soil moisture maps based on radar satellite imagery. *Proc. SPIE 10426. Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring*. 104260J (3 October 2017). Warsaw, Poland. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2278040>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод побудови карт вологості на основі часових рядів радіолокаційних даних та запропоновано його реалізацію у хмарному середовищі)

14. Hnatushenko Volodymyr V., Garkusha Igor N., **Vasyliiev Volodymyr V.** Research of Influence of Atmosphere and Humidity on the Data of Radar Imaging by Sentinel-1. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Proceedings*. P. 405-408.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизований пошук критеріїв впливу атмосфери при побудові карт вологості за радіолокаційними даними)

15. Hnatushenko V.V., Garkusha I.N., **Vasyliiev V.V.** Using SENTINEL-1 data for monitoring of soil moisture. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 23–28. 2017. Fort Worth, Texas, USA. P.1656-1659 <http://ieeexplore.ieee.org/document/8127291>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод моніторингу вологості ґрунту за даними SENTINEL-1 та його реалізацію у хмарному сервісі)

16. Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V.V. Accuracy Evaluation of Automated Object Recognition Using Multispectral Aerial Images and Neural Network. *Proc. SPIE 10806, Tenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018)*, 108060H (9 August 2018); doi:10.1117/12.2502905.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: дослідження оцінки точності розпізнавання об'єктів з використанням багатоспектральних аерофотознімків класифікованих методами нейронних мереж)

17. Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V.V. Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* IV-3. P.167-172. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-167-2018>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод і автоматизована інформаційна технологія (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних до рівня L2)

18. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Medyanovskyi K., **Vasiliiev V.**, Bulanaya T., Gomilko I. Air Quality Monitoring in Urban Areas Using in-Situ and Satellite Data Within Era-Planet Project. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Spain, Valencia. 2018. P. 1668–1671.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: хмарна технологія моніторингу якості повітря на основі наземних та супутникових даних)

19. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., Vasiliiev V. Land Cover and Land Use Monitoring Based on Satellite Data within World Bank Project. *Conference*

Proceedings of 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies. DESSERT 2019. No. 8770040. P. 127–130.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи)

20. Hnatushenko V.V., Polyakov M.V., **Vasyliiev V.V.** Urban change detection method of multi-temporal remote sensing images. *World Congress on GIS and Remote Sensing*. August 01-03, 2016. New Orleans, USA. *J Remote Sensing & GIS* 2016. 5:3(Suppl) <http://dx.doi.org/10.4172/2469-4134.C1.003>.

(Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія виявлення змін на різночасових зображеннях у інформаційну систему хмарної обробки)

21. Hnatushenko V.V., **Vasyliiev V.V.** Automatic cloud-based GIS analysis service. Тези 16-ї Української конференції з космічних досліджень. Одеса, 22-27 серпня 2016р. С. 174.

(Особистий внесок: архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки та ГІС аналізу)

22. **Васильев В.**, Гаркуша И., Мозговой Д., Гнатушенко В. Использование радарной съемки для мониторинга природных и техногенных ландшафтов. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей: (м. Київ, 2016 р.) - GEO-UA, 2016. ISBN 978-966-02-8019-9 (електронне видання). С. 11–14.*

(Особистий внесок: хмарна технологія оперативного доступу до архівних супутникових даних)

23. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.**, Чорненко М.В. Геоинформационные Web-сервисы Eos Data Analytics. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»*. м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 54–61.

(Особистий внесок: функціональний геоінформаційних хмарних Web-сервісів)

24. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Контроль природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса LANDSAT VIEWER. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»* м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 62–67.

(Особистий внесок: автоматизація методу виявлення антропогенних процесів за різночасовими супутниковими зображеннями у системі хмарної обробки)

25. Бусыгин Б.С., **Васильев В.В.**, Сергеева Е.Л. О создании геоинформационной системы по возобновляемой энергетике в Украине. Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Трускавець. 6–10 листопада 2017 р. С. 375–380.

(Особистий внесок: Web-сервіс обробки зображень високого просторового розрізнення)

26. Kavats A., Khramov D., Sergieieva K., **Vasyliiev V.**, Kavats Y. Geoinformation technology of agricultural monitoring using multi-temporal satellite imagery. ICAG 2018: 20th International Conference on Agriculture and Geoinformatics, Vienna, Austria. June 14-15, 2018.

(Особистий внесок: автоматизація методу моніторингу агротехнічних операцій за часовими рядами супутникових даних у хмарній інформаційній системі)

27. Гнатушенко В.В., Кавац О.О., Кавац Ю.В., **Васильев В.В.**, Інформаційна технологія виявлення антропогенних змін на різночасових зображеннях високого просторового. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 34–36.

(Особистий внесок: архітектура хмарної обробки різночасових супутникових зображень високого просторового розрізнення)

28. Кавац О.О., Сергеева К.Л., Храмов Д.О., **Васильев В.В.** Моніторинг сільськогосподарських угідь за даними Sentinel-1. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 31–33.

(Особистий внесок: автоматизація методу побудови карт когерентності з урахуванням часового ряду даних про опади і фенологічного календаря)

29. **Vasyliiev Volodymyr**, Kussul Nataliia, Karlov Eugene, Shelestov Andrii, Lavreniuk Mykola Satellite Crop Monitoring within World Bank Project on Land

Management Transparency in Ukraine. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 31-33.

(Особистий внесок: автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі)

30. Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., **Vasiliev V.** Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *Big Data from Space conference (BiDS)*. 2017. P. 122–125.

(Особистий внесок: автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі)

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧІ ОБРОБКИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ	24
1.1 Основні властивості сучасних геопросторових даних	25
1.2 Методи розв’язання прикладних задач на основі геопросторових даних	30
1.3 Сучасні інформаційні технології та прикладне програмне забезпечення для обробки геопросторових даних	35
1.4 Сучасні хмарні платформи для обробки геопросторових даних	39
1.4.1 Google Earth Engine	39
1.4.2 TEP	40
1.5 Необхідність інтеграції різномірних даних для розв’язання прикладних задач супутникового моніторингу	40
1.6 Постановка задачі.....	41
1.7 Висновки до першого розділу.....	42
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТА ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ.....	44
2.1 Виділення інформативних ознак на супутникових знімках для розв’язання прикладних задач.....	44
2.1.1 Підходи до оцінки точності	45
2.1.2 Проведення експериментів	48
2.2 Метод підвищення деталізації об’єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ICA, HSV та вейвлет-перетворень	53
2.3 Оцінювання точності підвищення інформативності та деталізації багатоспектральних зображень.....	60
2.4 Висновки до другого розділу	63
РОЗДІЛ 3 ХМАРНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ.....	66

3.1 Актуальність реалізації сервісів супутникового моніторингу в хмарному середовищі AWS	66
3.2 Обґрунтування вибору моделі обслуговування PaaS	67
3.3 Технологія обробки знімків в реальному часі на хмарних платформах	68
3.4 Алгоритм обробки супутникових даних в хмарному середовищі та архітектура сервісу.....	72
3.5 Хмарний сервіс супутникового моніторингу в реальному часі LandViewer – функціональність і застосування.....	76
3.6 Висновки до третього розділу.....	87
РОЗДІЛ 4 РОЗВ’ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХМАРНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ	88
4.1 Моніторинг антропогенного впливу в результаті видобутку бурштину	88
4.2 Моніторинг вирубки лісів	98
4.3 Оцінка збитків від лісових пожеж.....	102
4.4 Моніторинг посух	117
4.4.1 Технологія моніторингу сільськогосподарських посух.....	117
4.4.2 Технологія моніторингу гідрологічних посух	124
4.5 Моніторинг агротехнічних операцій на основі інтерферометричного аналізу радарних даних	128
4.5.1 Особливості обробки радарних даних	130
4.5.2 Опис методу.....	134
4.6 Висновки до четвертого розділу.....	140
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	144
ДОДАТОК А. СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	159
ДОДАТОК Б. ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	166

ВСТУП

На протязі останніх років космічні знімальні системи стрімко розвиваються. На даний момент вони дозволяють отримувати дані з просторовим розрізненням півметра і менше, а це важливо для створення кадастрових карт і планів, прокладання газотранспортних ліній, дослідження стану лісів, морських акваторій і шельфів тощо. Інформація, отримана методами дистанційного зондування з використанням аерокосмічних знімальних систем, є базою для створення цифрових моделей рельєфу, моніторингу довкілля і природних ресурсів Землі. Невід'ємною частиною космічних досліджень є подальша складна фотограмметрична обробка отриманих зображень. Враховуючи, що значні успіхи в галузі космічних програм, запуску нових супутників дозволили отримати велику кількість даних, окремому користувачеві або науковим колективам, що виконують як попередню, так і повну, обробку знімків необхідні комплексні інструменти, що дозволяють здійснювати ефективну розподілену роботу з подібними масивами даних. Актуальність дисертаційного дослідження визначається необхідністю розробки ефективних методів інтеграції зображень та інших геопросторових даних різного формату, пов'язаних з ними метаданих, а також забезпечення їх інтерактивного аналізу, управління та обміну.

З іншого боку, розвиток мережевих технологій і вдосконалення засобів передачі даних створили основу для побудови нового покоління систем обробки інформації – Web-орієнтованих систем аналізу отриманих зображень, проте їх практична реалізація вимагає опрацювання значного обсягу інформації. Тому для зниження обчислювальних витрат доцільно застосувати сучасні технології віртуалізації і хмарних обчислень, комбіновані моделі та алгоритми. В умовах випереджаючого розвитку інформаційних технологій і чергового спаду світової економіки технологія, яка дозволяє організаціям та іншим суб'єктам відмовитись від значних витрат на підтримку власної ІТ-інфраструктури та перейти на використання всіх необхідних ІТ-ресурсів онлайн, розглядається як перспективний та рентабельний модернізаційний вибір, оптимальна інвестиція в майбутнє. У

найрозвиненіших регіонах світу вже прийняті стратегічні рішення та плани дій щодо системного та комплексного розвитку хмарних сервісів, розгорнута відповідна робота. Є очевидним, що навіть порівняно з Грід-системами, архітектура хмарного сервісу є значно лаконічнішим, продуктивнішим і дешевшим рішенням.

Описаний вище сучасний стан хмарної обробки багатовимірних даних обумовлює актуальність теми дисертаційної роботи, що присвячена вирішенню суттєвої науково-прикладної проблеми розроблення інформаційної системи хмарної обробки багатовимірних даних ДЗЗ з метою підвищення ефективності їх аналізу, що надасть користувачеві можливість скоротити витрати в порівнянні з утриманням власної розвиненої ІТ-структури.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі комп'ютерних наук та інформаційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара відповідно до наукового напрямку «Методи та інформаційні технології цифрової обробки багатоканальних даних» (Держбюджетна НДР 0116U001297). Інформаційна технологія хмарної обробки багатовимірних аерокосмічних зображень впроваджена в ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» та використовувалась у міжнародному проекті програми ЄБРР «Підтримка прозорого землекористування в Україні» («Supporting Transparent Land Governance in Ukraine») (2018-2019 pp.).

Метою роботи є підвищення ефективності обробки та аналізу супутникових даних шляхом розробки нової хмарної інформаційної технології попередньої та тематичної обробки даних ДЗЗ, що надає користувачеві можливість скоротити витрати в порівнянні з утриманням власної розвиненої ІТ-структури.

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

- Проаналізувати сучасний стан розвитку методів та технологій аналізу супутникових даних.
- Вдосконалити метод і розробити автоматизовану інформаційну технологію (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних, забезпечивши можливість розв'язання широкого класу прикладних задач на основі уніфікованих даних рівня L2.

- Розробити метод підвищення інформативності та деталізації багатоканальних супутникових знімків на основі ICA (Independent Component Analysis) та вейвлет-перетворення.
- Розробити критерій визначення ефективності методу підвищення інформативності багатоспектральних зображень на основі вейвлет-перетворення.
- Розробити інформаційну технологію зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі.
- Вдосконалити методологію розв'язання прикладних задач супутникового моніторингу.

Об'єктом дослідження є багатовимірні геопросторові дані, зокрема багатоканальні супутникові дані різної природи (оптичні та радарні), що мають різне просторове розрізнення та одержані в різних діапазонах випромінювання.

Предметом дослідження є методи теоретичного аналізу та експериментального дослідження організації системи доступу користувачів до розподіленого обчислювального середовища на основі технології хмарних обчислень, методи побудови хмарної інфраструктури, методи інтеграції та консолідації програмних продуктів в розподіленому обчислювальному середовищі.

Методи дослідження – методи математичного моделювання, статистичний аналіз, геопросторовий аналіз, методи машинного навчання, методи хмарної обробки даних.

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

- Удосконалено метод попередньої обробки супутникових даних на основі злиття даних та продуктів їх обробки з різних джерел.
- Удосконалено метод підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоканальних супутникових знімках на основі ICA та вейвлет-перетворення та злиття з панхроматичним каналом, що дозволило на відміну від відомих раніше перетворень уникнути кольорових спотворень.

- Отримала подальший розвиток методологія визначення ефективності методів обробки супутникових багатоканальних зображень. Запропоновано критерій визначення ефективності методу підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоспектральних зображеннях у вигляді ентропії яскравостей, який, крім власно оцінки, може використовуватися як ефективний інструмент керування при обробці цифрової інформації з метою оптимізації параметрів на різних етапах перетворення зображень.
- Вперше розроблено інформаційну технологію зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі. Запропонована технологія забезпечує виконання задач супутникового моніторингу в реальному часі та їх масштабування на великі території без збільшення часу розв'язання задач.
- Удосконалено методологію розв'язання прикладних задач супутникового моніторингу на основі методів злиття різнорідних різночасових даних. Розроблено автоматизовані інформаційні технології моніторингу антропогенного впливу видобутку бурштину, моніторингу вирубок, оцінки збитків від лісових пожеж, моніторингу посух та моніторингу агротехнічних операцій.

Практичне значення одержаних результатів.

Розроблено інформаційну систему зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі. Запропонована технологія забезпечує виконання задач супутникового моніторингу в реальному часі та їх масштабування на великі території без суттєвого збільшення часу розв'язання задач. Розроблено методи тематичної обробки багатовимірних геопросторових даних, які дозволяють підвищити деталізацію об'єктів з подальшим розпізнаванням рослинності і водойм на території мегаполісів, проводити моніторинг і оцінку багаторічних посух та антропогенних процесів, проводити оцінку наслідків вирубок та пожеж лісових масивів, моніторинг незаконного видобутку бурштину, проводити моніторинг агротехнічних операцій на основі інтерферометричного аналізу радарних даних, будувати карти вологості ґрунтів та визначати вплив атмосфери за

радіолокаційними даними, проводити моніторинг якості повітря у міських районах тощо. Зокрема ці методи використано в рамках проекту ЄБРР «Підтримка прозорого землекористування в Україні» («Supporting Transparent Land Governance in Ukraine») для здійснення моніторингу змін земного покриву на основі часових рядів оптичних та радіолокаційних зображень з метою подальшої побудови карт класифікації поверхні Землі. Розроблені методи та інформаційні технології реалізовані у вигляді геопросторового Web-сервісу LandViewer, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс). Web-сервіс розгорнутий в різних геолокаціях для забезпечення максимальної швидкості передачі даних та відмовостійкості. Впровадження отриманих результатів підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача.

Результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, одержані автором особисто. У наукових публікаціях, створених у співавторстві, здобувачу належить: аналіз існуючих ГІС-технологій, методів оцінки наслідків лісових пожеж [1], автоматизована інформаційна технологія моніторингу незаконного видобутку бурштину в Україні за даними ДЗЗ [2], автоматизована інформаційна технологія оцінки наслідків вирубок лісових масивів за даними ДЗЗ на базі хмарної платформи [3], воркфлоу моніторингу цілей сталого розвитку в хмарному середовищі [4], автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи [5], архітектура хмарної системи обробки часових рядів супутникових даних [6], автоматизація методології моніторингу антропогенних процесів за багатоканальними супутниковими зображеннями у хмарному Web -сервісі [7], автоматизація методу розпізнавання [8], Web-архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних [9], автоматизація воркфлоу ідентифікації та оцінки зон ураження територій лісових масивів за різночасовими багатоканальними супутниковими зображеннями [10], автоматизована інформаційна технологія моніторингу вирубок лісових масивів [11], метод підвищення деталізації об'єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ІСА та оптимізованого вейвлет-перетворення [12], метод побудови карт вологості на основі часових рядів радіолокаційних даних та запропоновано його реалізацію у хмарному середовищі

[13], автоматизований пошук критеріїв впливу атмосфери при побудові карт вологості за радіолокаційними даними [14], метод моніторингу вологості ґрунту за даними SENTINEL-1 та його реалізацію у хмарному сервісі [15], дослідження оцінки точності розпізнавання об'єктів з використанням багатоспектральних аерофотознімків класифікованих методами нейронних мереж [16], автоматизована інформаційна технологія (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних до рівня L2 [17], хмарна технологія моніторингу якості повітря на основі наземних та супутникових даних [18], автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи [19], автоматизована інформаційна технологія виявлення змін на різночасових зображеннях у інформаційну систему хмарної обробки [20], архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки та ГІС аналізу [21], хмарна технологія оперативного доступу до архівних супутникових даних [22], геоінформаційний хмарний Web-сервіс [23], метод виявлення антропогенних процесів за різночасовими супутниковими зображеннями у системі хмарної обробки [24], Web-сервіс обробки зображень високого просторового розрізнення [25], автоматизація методу моніторингу агротехнічних операцій за часовими рядами супутникових даних у хмарній інформаційній системі [26], архітектура хмарної обробки різночасових супутникових зображень високого просторового розрізнення [27], автоматизація методу побудови карт когерентності з урахуванням часового ряду даних про опади і фенологічного календаря [28], автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі [29], автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі [30].

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 16-й українській конференції з космічних досліджень (Україна, Одеса, 22-27.08.2016 р.); на міжнародному науково-практичному форумі «НАУКА И БИЗНЕС» (Україна, м. Дніпро 1.07. 2016 р.); на конгресі World Congress on GIS and Remote Sensing (USA, New Orleans, 01-03.08.2016 р.); на п'ятій міжнародній конференції «GEO-UA 2016: аерокосмічні

спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Україна, Київ, 10-14.10.2016 р.); на XXIII конгресі ISPRS Congress (Czech Republic, Prague, 12-19.07.2016 р.); на конференціях 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (Україна, Київ, 18-20.04.2017 р.); International Geoscience and Remote Sensing Symposium (USA, Texas, Fort Worth, 23-28.07. 2017 р.); на Proc. SPIE 10426, Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring, (Poland, Warsaw, 11-14.09.2017 р.); на четвертій міжнародній науково-практичній конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування» (Україна, м. Трускавець, 6-10.11.2017 р.); на конференції «20th International Conference on Agriculture and Geoinformatics» (Vienna, Austria, 14-15.06. 2018 р.); на шостій міжнародній конференції «GEO-UA 2018, аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» (Україна, Київ, 18-19.09.2018 р.); 18th International Conference on Data Science and Intelligent Analysis of Information, ICDSIAI 2018 (Kyiv; Ukraine; 4-7.06. 2018 р.); 10-й Міжнародній конференції International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019 (Leeds, Great Britain, 5-7.06.2019 р.).

Публікації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 30 наукових працях, 14 з яких індексуються в міжнародній наукометричній базі Scopus. Вісім статей розкривають основний зміст дисертації: з них 3 у періодичних наукових виданнях інших держав [4–6], 5 — у наукових виданнях, включених до переліку фахових видань України [1–3, 7, 8]. Статті [1–6] індексуються в Scopus. Додатково результати дисертації представлені в 3 статтях [9–11], та 19 матеріалах міжнародних та Всеукраїнських наукових конференцій [12–30].

Структура та обсяг дисертації.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатку. Загальний обсяг дисертації становить 167 сторінок, містить 124 сторінки основної частини, включає 82 рисунки, 8 таблиць, 133 літературних джерела.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАДАЧІ ОБРОБКИ БАГАТОСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє отримати інформацію про різні об'єкти та динамічні процеси і явища на поверхні Землі, в її надрах і атмосфері шляхом реєстрації відбитого або власного електромагнітного випромінювання на відстані, без безпосереднього контакту [31]. Ця інформація отримується шляхом використання технічних засобів, які встановлені на повітряних або космічних носіях. Методи ДЗЗ з космосу характеризуються наступними перевагами [31, 32]:

- високою оглядовістю, можливістю одержання одночасної інформації про великі території;
- можливістю переходу від дискретної картини значень показників стану навколишнього середовища в окремих пунктах території до безперервної картини просторового розподілу показників;
- можливістю отримання інформації про важкодоступні райони;
- високим рівнем генералізації інформації.

Ці переваги найбільш відчутні у сфері глобального моніторингу, де оглядовість матеріалів і генералізація інформації грають істотну роль, а також у сфері національного моніторингу держав, що займають великі території. Однак і в сфері регіонального моніторингу, при вирішенні конкретних задач методи ДЗЗ можуть успішно доповнювати контактні методи вимірів, а в деяких випадках навіть перевершувати їх за інформативністю.

Сучасні супутникові багатоспектральні зображення є джерелом отримання різноманітної інформації. Наприклад, за таким видом зображень можна проводити оперативний моніторинг дислокації військової техніки, планування і контроль розвитку інфраструктури, моніторинг транспортної мережі міста та вирішувати багато інших задач.

Постійно зростаюча кількість супутникових систем завдяки комерційній підтримці різних країн і організацій дозволяє отримувати сканерні зображення

надвисокої роздільної здатності. Одночасно з цим покращуються також технічні характеристики супутникових систем. На сьогоднішній день супутник WorldView-3 дозволяє отримувати зображення надвисокого просторового розрізнення. У багатоспектральному режимі роздільна здатність системи складає 1,2 м, а в ближньому ІЧ — 3,7 м. Наслідком таких модифікацій технічних характеристик супутникових систем є зростання обсягу даних як кількісно, так і на одиницю зберігання. Наприклад, розмір сцени зображення зі супутникової системи IKONOS-2 [33] становить 370 МБайт, а WorldView-3 — близько 3.5 ГБайт. При первинній та тематичній обробці багатоканальних зображень розмір зростає пропорційно до кількості спектральних каналів і може досягати 28 ГБайт (8 багатоспектральних каналів WorldView-3). Таке зростання обсягів інформації вимагає розробки нового швидкодіючого прикладного програмного середовища, яке дозволяє застосовувати технології та алгоритми тематичної обробки, при цьому збільшувати продуктивність за рахунок скорочення часу обробки. Швидкість роботи та доступ розробників і користувачів можуть бути забезпечені прикладним програмним забезпеченням на основі хмарних обчислень.

1.1 Основні властивості сучасних геопросторових даних

Технології дистанційного зондування Землі з космосу є незамінним інструментом дослідження і постійного моніторингу нашої планети, що допомагає ефективно використовувати природні ресурси і керувати ними. Космічні системи моніторингу включають (і виконують):

1. Керування польотами і зйомкою з центру управління за допомогою компонентів супутникових систем, розташованих на орбіті;
2. Прийом інформації наземними пунктами прийому, супутниками-ретрансляторами;
3. Зберігання і поширення матеріалів (центри первинної обробки, архіви знімків). Як правило, для спрощення доступу до супутникових зображень

розробляються інформаційні пошукові системи, що забезпечують накопичення і систематизацію матеріалів, отриманих з штучних супутників Землі.

Космічні системи ДЗЗ дозволяють за короткий час отримати необхідні дані з великих площ (в тому числі важкодоступних і небезпечних ділянок). Дані ДЗЗ є ефективним інструментом, що дозволяє швидко і детально дослідити стан навколишнього середовища, активізувати процес вивчення і використання природних ресурсів, вирішувати задачі метеорології та сільського господарства, отримувати об'єктивну картину світу. Зокрема за останні роки в області обробки мультиспектральних знімків одними з пріоритетних завдань залишаються прогнозування погодних умов, оцінка ризику повеней, пожеж, зсувів, а також оцінка збитків при надзвичайних ситуаціях.

Для розв'язання цих задач західними і вітчизняними дослідниками використовуються зображення, що надаються у відкритому доступі, як низького (супутники Terra, NOAA), так і високого (супутники Landsat, Sentinel) просторового розрізнення. Такі дані використовуються як основа для виконання багатьох наукових та інноваційних проектів. Зокрема, протягом останніх років вітчизняні вчені взяли практичну участь, наприклад, в проектах наступних міжнародних програм та ініціатив INTAS, FP7, HORIZON 2020, JECAM, тощо. Таким чином, в Україні накопичено великий досвід використання мультиспектральних, панхроматичних, радарних зображень для вирішення різних завдань контролю за зміною погодних умов і можливих кризових ситуацій, пов'язаних з цим [34]. Також однією з ключових завдань, що вирішуються за допомогою даних ДЗЗ в інтересах картографування, є моніторинг та побудова карт вологості Землі.

З появою у вільному доступі великих об'ємів різноманітних супутникових даних (як оптичних, так і радарних) завершилась стадія демонстрації можливостей ДЗЗ і розпочалась нова фаза розвитку спостережень Землі з космосу на сучасній технологічній основі, основною відмінністю якої став запуск масштабних інноваційних проектів супутникового моніторингу [35-37].

Щороку на орбіті з'являються нові супутники, призначені на вирішення різних завдань і проведення зйомки в різних діапазонах електромагнітного спектра.

Зокрема, Sentinel — космічна місія, яка фінансується Європейським Союзом і здійснюється ESA (European Space Agency) в межах програми Copernicus. 3 квітня 2014 р. Європейське космічне агентство вивело на орбіту радіолокаційний супутник Sentinel-1A, що дозволило розв'язувати прикладні задачі у моніторинговому режимі [10-12, 37]. 22 квітня 2016 р. на орбіту був виведений другий супутник – Sentinel-1B. Очікується, що періодичність зйомки скоротиться до 5 діб, що дозволить отримувати ще більшу кількість знімків, забезпечуючи стабільність і надійність космічного моніторингу. При використанні таких супутникових систем виявлення об'єктів відбувається за рахунок опромінення поверхні електромагнітними хвилями і отримання відбитих імпульсів. При цьому відстань до мети визначається за часом проходження хвилі до об'єкту і назад [38].

Запуск у використання подібної знімальної системи з такими характеристиками (10 м просторове розрізнення та повторна зйомка 3-6 днів) дозволив багато прикладних задач розв'язувати в моніторинговому режимі.

Крім підвищення просторового розрізнення та збільшення числа режимів зйомки важливою тенденцією в розвитку супутникових радарних систем є розширення поляризаційних можливостей, а саме, можливість одночасної зйомки в чотирьох поляризаціях. Унікальна особливість повністю поляриметричних даних полягає в можливості класифікації об'єктів на знімку за фізичним типом відображення.

До переваг радарної зйомки, важливих для вирішення картографічних завдань, відносяться:

- незалежність від погодних умов;
- незалежність від умов освітленості;
- чутливість до біофізичних (вологість, біомаса) і структурно-геометричних особливостей ґрунтового-рослинного покриву.

Недоліками радарних знімків є:

- складність тематичної інтерпретації;
- зашумленість даних;
- вплив рельєфу і кута нахилу;

- негативний вплив шорсткості поверхні.

До традиційних областей, в яких ефективно використовуються SAR-технології [39, 40], відносяться наступні: лісове господарство; управління ресурсами; підвищення продуктивності сільськогосподарських культур, оцінка змін клімату і його впливу на довкілля; дослідження океанських і річкових течій, якості води, ерозійних процесів; оцінка ризику повеней і збитку при ЧС; моніторинг арктичних територій, льодової обстановки, планування розвитку територій; топографічне і тематичне картографування, моніторинг та побудова карт вологості.

Незалежність даних супутника Sentinel-1 від наявності хмар, дощу і освітлення земної поверхні робить його особливо корисним для моніторингу несприятливих погодних умов, повеней, зсувів і інших надзвичайних ситуацій. Зображення, отримані до і після кризових ситуацій, дозволяють оперативно оцінити масштаби майнових та екологічних збитків. Ці зображення можуть використовуватися для точного моніторингу деформації рельєфу по зсувних, сейсмічних або таких, що опускаються районах шляхом регулярних і частих інтерферометричних спостережень. Місія Sentinel-1 надає також інформацію про вітер і хвилі, яка може використовуватись для відстежування переміщень нафтових плям та інших забрудників. Супутники Sentinel-1 суттєво спрощують аналіз повеней та інших природних катаклізмів з використанням методів InSAR.

Паралельно з запуском нових космічних апаратів продовжується експлуатація апаратури ДЗЗ, орієнтованої на отримання кількісних характеристик електромагнітного випромінювання. У даному класі систем ДЗЗ можна виділити декілька підкласів, а саме, нескануючі радіометри, спектрорадіометри та лідари [41–47].

Спектрометрична (СМ) зйомка проводиться для вимірювання відбиваючої здатності гірських порід. Знання значень коефіцієнта спектральної яскравості гірських порід розширює можливості геологічного дешифрування, надає йому більшу вірогідність. Гірські породи мають різну відбивну здатність, тому відрізняються величиною коефіцієнта спектральної яскравості. СМ-зйомка ділиться на три наступних види:

1. Мікрохвильова (0,3 см–1,0 м), що є універсальною, оскільки виключає вплив атмосфери.

2. ІЧ або теплова (0,30–1000 мкм), що дозволяє виявити температурні неоднорідності по енергетичної яскравості досліджуваних об'єктів.

3. Спектрометрія видимого і близького ІЧ-спектра випромінювання (0,30–1,40 мкм), яка фіксує спектральний розподіл відбивного радіаційного випромінювання.

Геологічні об'єкти відображаються на зображеннях з різним контрастом, що залежить від їх спектральних особливостей. Робота зі складання банку даних про спектральні характеристики гірських порід надзвичайно трудомістка. Для її виконання необхідно провести спектрометричні вимірювання гірських порід, а також інших ландшафтних об'єктів, на різних відстанях, в різні пори року, на ділянках з різним ступенем оголеності. В той же час ці дані є абсолютно необхідними для систем автоматичного пошуку і розпізнавання об'єктів, в тому числі і для розв'язання екологічних задач. Для розширення контрасту часто використовуються багатозональні зображення, отримані у відносно вузьких зонах спектра [41–47].

Лідарна зйомка (транслітерація LIDAR англ. Light Identification, Detection and Ranging) є технологією отримання та обробки інформації про віддалені об'єкти за допомогою активних оптичних систем, що використовують явища відбиття світла і його розсіювання в прозорих і напівпрозорих середовищах. Як прилад лідар представляє собою активний далекомір оптичного діапазону. Скануючі лідари в системах машинного зору формують двовимірну або тривимірну картину навколишнього простору. Атмосферні лідари здатні не тільки визначати відстані до непрозорих відображень цілей, а й аналізувати властивості прозорого середовища, що розсіює світло. Різновидом атмосферних лідарів є доплерівські лідари, що визначають напрямок і швидкість переміщення повітряних потоків в різних шарах атмосфери.

Лідарна зйомка є активною і заснована на безперервному отриманні відгуку від відбиваючої поверхні, що підсвічується лазерним монохроматическим

випромінюванням з фіксованою довжиною хвилі. Частота випромінювача налаштовується на резонансні частоти поглинання скануючого компонента (наприклад приповерхневого метану), так що в разі його помітних концентрацій співвідношення відгуків в точках концентрування і поза ними будуть чітко відрізнятися. По суті лідарна спектроскопія — це геохімічна зйомка приповерхневих шарів атмосфери, орієнтована на виявлення мікроелементів або їх з'єднань, що концентруються над сучасно активними геоекологічними об'єктами. Як правило, пристрої лідарної зйомки використовуються на низьковисотних літаючих апаратах.

Зазвичай для дистанційного зондування використовуються два основні типи супутників (штучні супутники Землі — ШСЗ): геостационарні і полярноорбітальні. Якщо супутники першого типу забезпечують постійний огляд однієї і тієї ж частини земної поверхні, зберігаючи незмінне положення щодо певної точки на екваторі, то другі, перебуваючи на орбіті, площа якої приблизно перпендикулярна площині обертання Землі, через певний період часу, тривалість якого залежить від ширини смуги огляду ШСЗ, дозволяють здійснити заданий район спостереження.

1.2 Методи розв'язання прикладних задач на основі геопросторових даних

ДЗЗ — інструмент отримання об'єктивної інформації для підтримки прийняття оперативних управлінських рішень шляхом врахування динаміки процесів різного характеру. ДЗЗ відноситься до пріоритетних напрямів технологічного розвитку, в тому числі і в Україні, де актуальним залишається питання широкого залучення в практичну діяльність сучасних методів і технологій ДЗЗ для створення ефективних алгоритмів обробки даних в різних народногосподарських сферах [48, 49].

Методи обробки космічних знімків поділяють на методи попередньої і тематичної обробки. Попередня обробка космічних знімків — це набір операцій, спрямований на усунення різних спотворень зображення та виконання певних

стандартних дій (орторектифікація тощо). Спотворення можуть бути обумовлені недосконалістю реєструючої апаратури і можуть бути пов'язані з наступним:

- впливом атмосфери;
- перешкодами, пов'язаними з передачею зображень по каналах зв'язку;
- геометричними спотвореннями, пов'язаними з методом космічної зйомки;
- умовами освітлення підстильної поверхні;

Тематична обробка космічних знімків пов'язана з виконанням набору операцій над знімками, які дозволяють розв'язати ту чи іншу прикладну задачу [31].

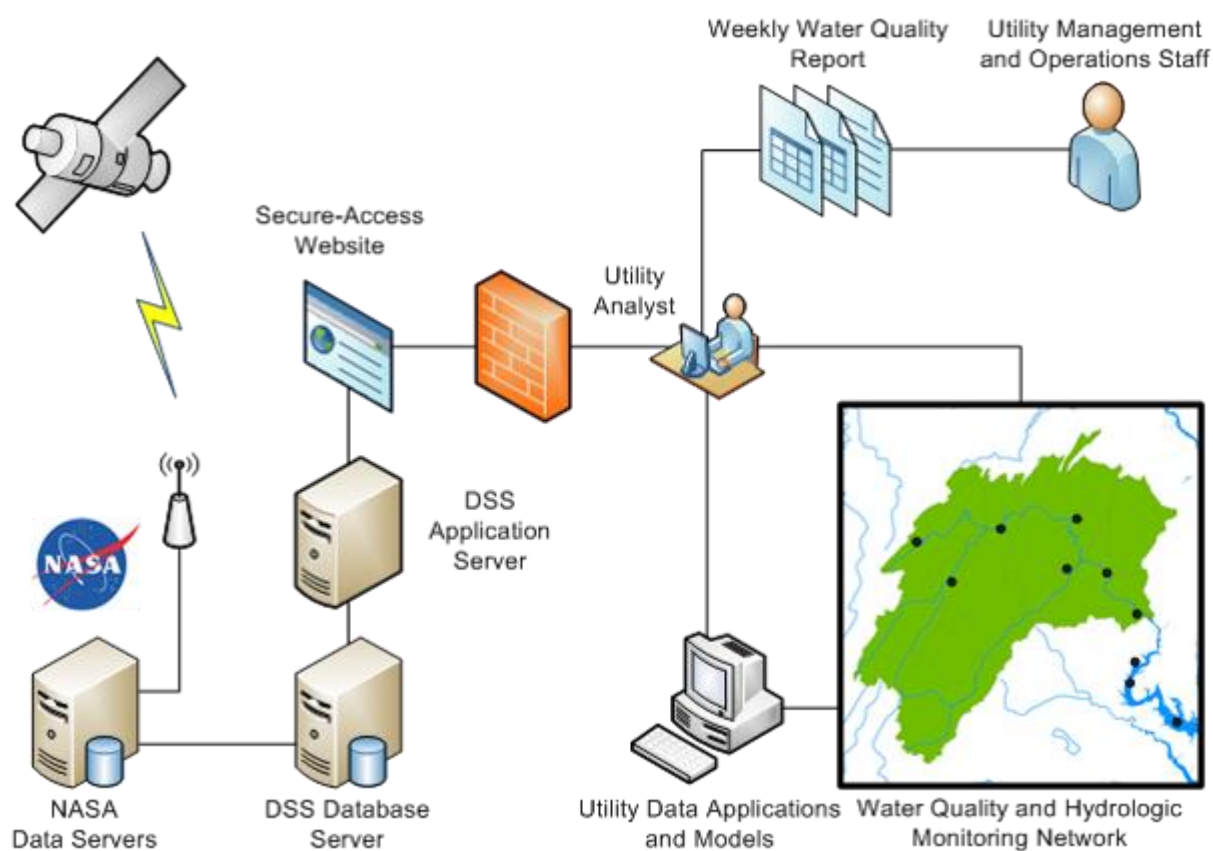


Рисунок 1.1 — Типова схема взаємодії підсистем ДЗЗ

Аналіз літератури [36, 37, 50-53] показав, що на сьогоднішній день супутникові дані дистанційного зондування дозволяють вирішувати наступні задачі моніторингу стану довкілля: визначення метеорологічних характеристик: вертикальні профілі температури, інтегральні характеристики вологості, характер хмарності і т.д.; контроль динаміки атмосферних фронтів, ураганів, створення карт

крупних стихійних лих; визначення температури підстилаючої поверхні, оперативний контроль і класифікація забруднень ґрунту і водної поверхні; виявлення масштабних або постійних викидів промислових підприємств; контроль техногенного впливу на стан лісопаркових зон; виявлення крупних пожеж і виділення пожежонебезпечних зон у лісі; виявлення теплових аномалій і теплових викидів великих виробництв і ТЕЦ в мегаполісах; реєстрація димних шлейфів від труб; моніторинг сезонних паводків і розливів річок; виявлення і оцінка масштабів зон великих повеней; контроль динаміки снігових покривів і забруднень снігового покриву в зонах впливу промислових підприємств.

На стан рослинності сільгоспугідь найбільш небезпечний вплив надають сільськогосподарські посухи [54-56], що перевершують метеорологічні за тривалістю і масштабами впливу. Супутникові дані дозволяють здійснювати моніторинг посух та оцінку збитків, оскільки посухи завдають колосальної шкоди багатьом сферам економіки, екології і т.д. [57–63]. Сільськогосподарська посуха характеризується тривалим дефіцитом вологи в ґрунтах та, на відміну від метеорологічної, призводить до стресу рослин, зменшення біопродуктивності і врожаю.

Метеорологічний сервіс gr5.ua з періодичністю 30 хвилин оновлює дані про температуру і опади в табличному форматі (.xlsx, .csv) по 256 метеостанціях на території України. Архіви даних містять показники температури (°C), кількості опадів (мм) і товщини снігового покриву (мм), значення яких можуть бути приведені до середньодобових шляхом підсумовування/усереднення. Альтернативні сервіси — pogodaiklimat.ru, meteopost.com, meteoblue.com, ogimet.com.

Показники, що використовуються для моніторингу посух:

- 1) середньодобова температура повітря, виміряна за даними наземного моніторингу, — точкові значення в вузлах мережі метеостанцій або растр проінтерпольованих значень (°C);
- 2) щоденні дані сервісу gr5.ua по накопиченим опадам — точкові значення в вузлах мережі метеостанцій або растр проінтерпольованих значень (мм).

До метеоданих, отриманих на основі супутникової інформації, відносяться наступні:

1) **Дані про температуру.** Щоденна приповерхнева температура MODIS (MOD11A1/MYD11A1) з просторовим розрізненням 1 км — растр значень температури (°C); 8-денний композит приповерхневої температури MODIS (MOD11A2/MYD11A2) з просторовим розрізненням 1 км — растр значень температури (°C).

2) **Дані про опади.** Дані про накопичені опади Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) с 30-хвилинним періодом накопичення і просторовим розрізненням 10 км доступні після реєстрації; MODIS Snow Cover 8-Day L3 Global (MOD10A2/MYD10A2) — карта снігового покриву, 8-денний композит з просторовим розрізненням 500 м. Дані доступні з використанням утиліти MODISsp; Meteosat Multi-Sensor Precipitation Estimate (MPE) з просторовим розрізненням 5 км.

3) **Дані про випаровування.** MODIS Net Evapotranspiration 8-Day L4 Global 500m (MOD16A2 / MYD16A2). Продукти — Evapotranspiration (ET), Latent Heat Flux (LE), Potential ET (PET), Potential LE (PLE). Одиниці виміру - мм / 8 днів.

4) **Дані про стан рослинного покриву.** MODIS NDVI — 8-денні композити MOD09Q1 і MYD09Q1 з просторовим розрізненням 250 м.

У Табл. 1.1 представлені загальні відомості про просторово-часових характеристик даних супутникового моніторингу посух.

Оскільки сільськогосподарські посухи призводять до виникнення стресу рослин, крім метеорологічних параметрів треба контролювати також стан рослинного покриву з використанням вегетаційних індексів, таких як Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Water Index (NDWI) і ін. Для виявлення посушливих територій можна використовувати нормалізований різницевий індекс посух (Normalized Multi-band Drought Index, NMDI):

$$NMDIVEG = \frac{[NIR - (SWIR1640 - SWIR2130)]}{[NIR + (SWIR1640 - SWIR2130)]}, \quad (1.1)$$

$$NMDISOIL = \frac{0.9 - [NIR - (SWIR1640 - SWIR2130)]}{[NIR + (SWIR1640 - SWIR2130)]}. \quad (1.2)$$

Таблиця 1.1 Джерело супутникових даних моніторингу посух

Джерело даних	Просторова роздільна здатність	Часове розрізнення
Опади		
GPM IMERG Late	10 км	30 хвилини
MODIS Snow Cover (MOD10A2/MYD10A2)	500 м	8 днів
Meteosat Multi-Sensor Precipitation Estimate (MPE)	5 км	
Температура		
MODIS Land Surface Temperature (MOD11A2/MYD11A2)	1 км	8 днів
Рослинність		
MODIS NDVI (MOD09Q1/MYD09Q1)	250 м	8 днів
METOP-AVHRR	1.1 км	10 днів
Vegetation Health (VIIRS)	4 км	

Індекс NMDI використовується для виділення посушливих територій. Існують різні вирази NMDI для ґрунту (NMDISOIL) і рослинного покриву (NMDIVEG). Ґрунт виділяється на основі індексу NDVI. Для відкритих ґрунтів значення NDVI знаходяться в діапазоні від 0.05 до 0.25. Таким чином, NMDI є комбінацією NMDIVEG і NMDISOIL. Низькі значення NMDI (0–0.2) відповідають посушливим ділянкам. Значення NMDI, близькі до 1, відповідають водоймам і територіям з високою вологістю, наприклад, ділянкам з густою рослинністю.

Для прийняття рішення щодо інтенсивності посухи можна порівняти дані за поточний вегетаційний сезон з багаторічними даними моніторингу, наприклад, з використанням продуктів Vegetation Health.

Продукти Vegetation Health з просторовим розрізненням 4 км сформовані за даними AVHRR (1981–2012 pp.) і VIIRS (з 2013 р.). До них відносяться наступні:

1) Temperature Condition Index (TCI) — оцінює температуру яскравості ділянки поверхні в порівнянні з середньобаторічною нормою:

$$TCI = 100 * \frac{(BT_{max} - BT)}{(BT_{max} - BT_{min})}, \quad (1.3)$$

де BT — яскравісна температура пікселя; $BT_{\max}$, $BT_{\min}$ — максимальна і мінімальна яскравісні температури пікселя за весь період спостережень (1981 р. — теп. час).

2) Vegetation Condition Index (VCI):

$$VCI = 100 * \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})}. \quad (1.4)$$

3) Vegetation Health Index (VHI):

$$VHI = a * VCI + (1 - a) * TCI. \quad (1.5)$$

Для якісного і кількісного оцінювання посух використовується індекс посухи Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), який порівнює температуру ґрунту і рослин:

$$TVDI = \frac{(T_{\text{surface}} - T_{\min})}{(T_{\max} - T_{\min})}, \quad (1.6)$$

де $TVDI = 0$ — вологий ґрунт, $TVDI = 1$ — сухий ґрунт, T_{surface} — температура поверхні; $T_{\max}$, $T_{\min}$ — максимальна і мінімальна температури поверхні, визначена за допомогою діаграми LST vs NDVI по району, області, країні.

1.3 Сучасні інформаційні технології та прикладне програмне забезпечення для обробки геопросторових даних

Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) відносяться до програмного забезпечення одного з 2 типів, OpenSource (з відкритим програмним кодом, безкоштовне) або Proprietary (комерційне). Головною перевагою програмного забезпечення (ПЗ) з відкритим кодом є можливість працювати з кодом програми, тим самим модифікувати та змінювати його функціональність. Основним ідеологом такого підходу до використання програмного коду є Брюс Перенс.

Історія розвитку відкритого ПЗ ГІС починається з кінця 1970 рр.—початку 1980 рр. 20 століття, і пов'язана зі створенням в 1978 р. за ініціативою Служби охорони рибних ресурсів і диких тварин США відкритої векторної ГІС MOSS (Map Overlay and Statistical System). Її поява є однією з ключових подій, що визначила подальший напрям розвитку геоінформаційних систем.

MOSS стала першою інтерактивною ГІС, призначеною для роботи на міні-комп'ютерах і поєднала в собі можливість роботи як з растровими, так і з векторними даними. Свого часу MOSS використовувалася для вирішення різних задач як на рівні міністерств США, так і в багатьох урядах штатів і місцевих органів влади.

Незважаючи на те що MOSS з'явилася першою, велику популярність і широке поширення отримала інша ГІС — GRASS (Geographic Resources Analysis Support System), що з'явилася як альтернатива комерційному продукту ARC / INFO компанії ESRI (компанія розробляє комерційне програмне забезпечення). Розробка GRASS почалася в 1982 р. військовими США (US Army Corpsoft Engineers Construction Engineering Research Laboratory, CERL) як закритий проект. На початковому етапі свого розвитку GRASS була досить популярна, однак внаслідок активних дій ESRI ця популярність починала поступово знижуватися. Незабаром з'ясувалося, що, навіть маючи команду професійних розробників, численні підрозділи армії США виявилися не готовими витратити сили на використання GRASS, віддаючи перевагу продуктам від ESRI, як більш простим у використанні. Військові США поступово відмовилися від подальшої підтримки GRASS; команда розробників була розформована і більше ніколи не збиралася разом.

Офіційно статус відкритої ГІС GRASS отримала через 17 років в 1999 р. В даний час GRASS має велику кількість користувачів і незалежних розробників і часто зустрічається в академічному середовищі. Найуспішнішою альтернативно GRASS сьогодні є QGIS.

Програмний комплекс ENVI ліцензований провідними операторами космічних даних, одержуваних із супутників QuickBird, Ikonos, Orbview, Cartosat-1, Formosat-2, Resourcesat-1, SPOT, IRS, Landsat та ін. Крім фіксованих моделей сенсорів, включених у програмний комплекс, користувач може виконати геометричну корекцію довільного сканерного зображення, використовуючи модифікований алгоритм DLT (Direct Linear Transformation), закладений у програмний комплекс ENVI. Він призначений для візуалізації та обробки даних і надає набір інструментів для проведення повного циклу обробки даних від орт трансформування і

географічної прив'язки зображення до одержання необхідної інформації і її об'єднання з іншими даними.

Відмінною рисою програмного комплексу ENVI є його відкрита архітектура та наявність мови програмування IDL (Interactive Data Language), за допомогою якої можна істотно розширити функціональні можливості програми для вирішення спеціалізованих задач: автоматизувати існуючі алгоритми, а також створювати власні алгоритми обробки даних і виконувати пакетну обробку даних. ENVI містить спектральні бібліотеки, алгоритми та інструменти для виконання спектрального аналізу, які постійно оновлюються. ENVI підтримує широкий діапазон растрових і векторних форматів, таких як ESRI SHP, MapInfo TAB, MapInfo MID/MIF і багато інших. Можливе створення і редагування растрових і векторних шарів, перегляд і редагування атрибутивних таблиць. Програмний комплекс ENVI відповідає всім основним вимогам, необхідним при обробці зображень, та включає в себе наступні основні функції:

- візуалізація та обробка даних дистанційного зондування;
- обробка та спектральний аналіз мульти- і гіперспектральних зображень [65];
- географічна прив'язка зображень;
- ортотрансформування;
- створення ЦМР на основі стереозображень;
- тривимірна візуалізація;
- топографічний аналіз;
- обробка й аналіз даних радарної й лідарної зйомки;
- інтерактивне дешифрування й класифікація;
- аналіз рослинності з використанням вегетаційних індексів (NDVI) [66];
- геометрична і радіометрична корекція;
- інтерактивне спектральне й просторове поліпшення зображень;
- калібрування й атмосферна корекція;
- підтримка растрових і векторних форматів;

- забезпечення підтримки даних дистанційного зондування, отриманих із супутників WorldView-1, QuickBird, FORMOSAT-2, IKONOS, CartoSat, ALOS, EROS, Orbview, SPOT, IRS, TERRA (ASTER), Landsat, і ін.

Серед недоліків розглянутого програмного забезпечення принциповим є робота лише з окремим знімком. Можливість обробки часових рядів зображень, або одночасної обробки знімків, що покривають велику територію (розпаралелювання операцій), в наявному на даний час програмному забезпеченні відсутня. Це унеможливорює використання наявного програмного забезпечення для розв'язання операційних задач підтримки прийняття управлінських рішень для великих територій.

Для обробки радарних знімків широко використовується програмне забезпечення з відкритим кодом SNAP, розроблене Європейським космічним агентством. До складу SNAP входить панель Sentinel-Toolbox, спеціально призначена для обробки даних супутників Sentinel. Варто зазначити, що алгоритми геообробки Sentinel-Toolbox доступні для використання за допомогою відкритих бібліотек GitHub, отже, можуть бути легко інтегровані в сторонні додатки розробників по всьому світу.

Архітектура SNAP ідеально підходить для обробки і аналізу даних спостереження Землі за рахунок наступних основних технологічних нововведень:

- розширюваність;
- переносимість;
- модульна клієнтська платформа;
- загальна абстракція даних EO;

Водночас слід зазначити, що SNAP представляє собою лише бібліотеку функцій. Необхідність і послідовність використання елементів цієї бібліотеки при розв'язанні конкретної задачі на основі даних з певних супутників є предметом експериментального дослідження в кожному окремому випадку.

1.4 Сучасні хмарні платформи для обробки геопросторових даних

1.4.1 Google Earth Engine

Хмарна платформа Google Earth Engine дозволяє користувачам вирішувати задачі обробки геопросторових даних на обчислювальній платформі Google [67]. Для взаємодії з платформою користувач може скористатися різними способами. Так, редактор коду (Code Editor) представляє собою Web-орієнтовану систему розробки (IDE, Integrated Development Environment) для написання та запуску скриптів. Оглядач (Explorer) — це Web-додаток для перегляду каталогу даних, що доступні користувачам та проведення найпростішого аналізу. Використання програмного інтерфейсу Google Earth Engine (API) доступне через клієнтські бібліотеки для мов Python та JavaScript.

Code Editor [67] доступний на code.earthengine.google.com та орієнтований на Earth Engine JavaScript API. Тому у користувачів хмарного сервісу є всі можливості для реалізації складних потоків обробки даних за мінімальний час. Основні елементи Code Editor представлені на Рис. 1.2. Можливим є також використання Google Earth Engine напряду з Python середовища з виконанням основних ресурсоємних кроків обробки у хмарній інфраструктурі.

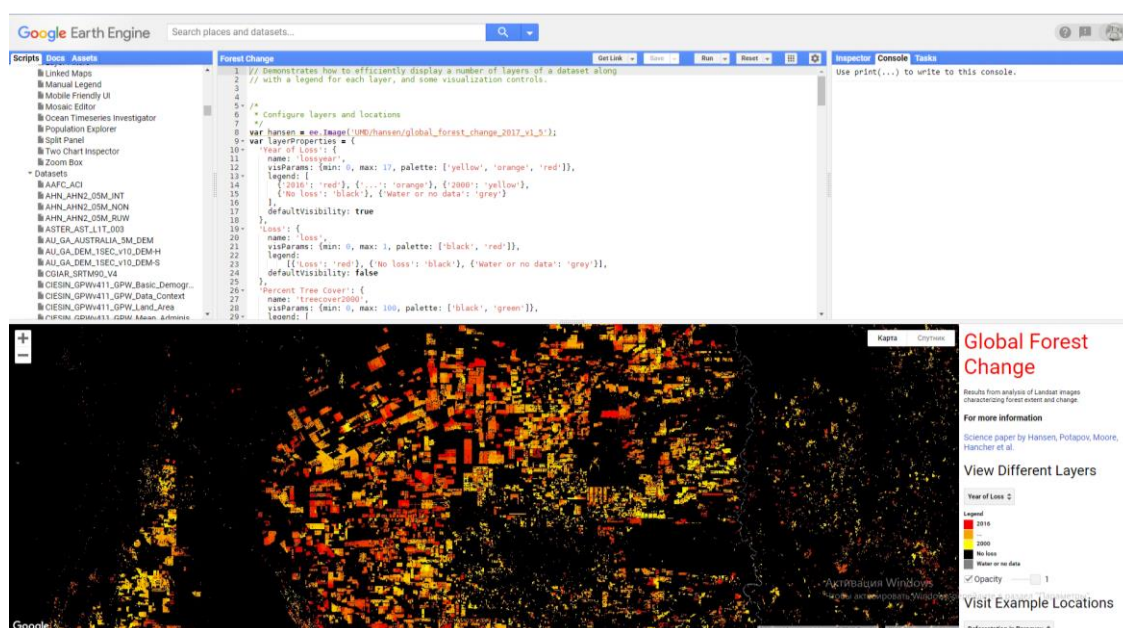


Рисунок 1.2 — Основний інтерфейс редактору коду (Code Editor)

1.4.2 ТЕР

Ще один підхід до обробки супутникових даних у хмарі демонструє ініціатива Європейського космічного агентства по запуску тематичних експлуатаційних платформ (Thematic Exploitation Platforms, TEPs), започаткована у 2014 р. [68]. Ця ініціатива спрямована на створення екосистеми для вирішення задач у сфері моніторингу узбережжя, лісів, гідрології, аналізу ризиків надзвичайних ситуацій природного характеру, моніторингу стану розвитку міст тощо.

ТЕР представляє собою віртуальну інфраструктуру, що взаємодіє з користувачами, об'єднаними у групи, програмними засобами, обчислювальними ресурсами шляхом надання єдиного погодженого інтерфейсу. Основа концепції ТЕР — зміщення акценту саме на роботу користувачів з даними та програмними засобами, доступними у середовищі ТЕР напряду.

Головним недоліком цих хмарних платформ є відсутність на даний момент можливості виконання завдань користувача “на льоту” — має місце деяка затримка між запуском задачі та моментом отримання результату.

1.5 Необхідність інтеграції різнорідних даних для розв’язання прикладних задач супутникового моніторингу

На даний момент вже запущено багато супутників по дослідженню Землі, що продукують великі обсяги супутникових даних. Це і місія Sentinel Європейського космічного агентства (апарати Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5), і місії NASA (MODIS Terra & Aqua, Landsat) тощо. Усі ці апарати оснащені сенсорами із різними технічними характеристиками (як просторовими, так і часовими), мають різну природу зйомки (радар, оптичні сенсори).

Робота із оптичними супутниковими даними дає змогу отримати вищу деталізацію карт класифікації земного покриття, однак самі дані містять хмари, що породжує потребу у попередній обробці таких даних для пошуку хмар, тіней від

хмар та відновлення захмарених ділянок на основі аналізу часового ряду супутникових знімків.

Ця проблематика обумовлює необхідність злиття даних [69-73] із різних сенсорів (наприклад Sentinel-2 та Landsat-8), однак їх злиття потребує врахування ряду важливих моментів [71-73]: різна просторова роздільна здатність (10 м у Sentinel-2 та 30 м — Landsat-8), різна часова роздільна здатність (6/12 днів у Sentinel-2 та 16 днів у Landsat-8), різні діапазони значень, отриманих за допомогою сенсорів космічного апарату [37, 74-77].

Для вирішення цих проблем необхідно розробити автоматизовані процедури відновлення хмар, побудови безхмарних композитних зображень, підвищення просторової роздільної здатності та інформативності даних, а також приведення знімків до узгоджених діапазонів значень.

З іншого боку, поєднання даних різної природи (радар + оптика) також дає цікаві можливості по підвищенню точності розв'язання прикладних задач супутникового моніторингу [77-79]. Так, для окремих територій України злиття радарних даних Sentinel-1 та оптичних даних Sentinel-2 дозволяє отримати приріст загальної точності карти класифікації на 3-4% у порівнянні з використанням лише оптичних даних Sentinel-2.

Всі ці процедури потребують значних обчислювальних ресурсів, як для попередньої обробки, так і для злиття даних різної природи та їх класифікації [80-81].

Їх реалізація потребує використання потужних обчислювальних ресурсів та масштабованих засобів для зберігання результатів обробки, що може бути ефективно вирішене із використанням сучасних хмарних платформ.

1.6 Постановка задачі

Незважаючи на широкий діапазон функцій, сучасні програмні комплекси забезпечують лише обробку кожного окремого знімка і не дозволяють працювати з часовими рядами супутникових даних. Водночас, розв'язання реальних прикладних

задач потребує використання різночасових, різнорідних супутникових зображень. Є запит на розв'язання задач моніторингу в реальному часі і для великих територій, що потребує використання потужних обчислювальних ресурсів і реалізації програмного забезпечення на хмарних платформах. Саме така задача ставиться в дисертаційному дослідженні.

Метою дисертаційного дослідження є створення теоретичної та алгоритмічної бази, розробка методів ефективного розв'язання прикладних задач на основі злиття різнорідних різночасових даних, а також розробка нових інформаційних технологій хмарної обробки багатовимірних супутникових зображень, що повинна надати користувачам платформи також можливість її налаштування для власних потреб. Для досягнення цієї мети необхідно *вирішити такі основні задачі*:

- Проаналізувати сучасний стан розвитку методів та технологій аналізу супутникових даних.
- Вдосконалити метод і розробити автоматизовані інформаційні технології (воркфлоу) і системи попередньої обробки супутникових даних, забезпечивши можливість розв'язання широкого класу прикладних задач на основі уніфікованих даних рівня L2.
- Розробити метод підвищення інформативності та деталізації багатоканальних супутникових знімків.
- Розробити критерій визначення ефективності методу підвищення інформативності багатоспектральних зображень.
- Розробити інформаційну технологію зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі.
- Вдосконалити методологію розв'язання прикладних задач супутникового моніторингу.

1.7 Висновки до першого розділу

У даному розділі виконано аналітичний огляд сучасного стану розвитку методів та технологій аналізу супутникових даних, обґрунтовано необхідність

розробки методів підвищення інформативності зображень на основі злиття різнорідних даних та ефективних робастних автоматизованих хмарних технологій та систем обробки супутникових даних в реальному часі.

Показано, що дані ДЗЗ є ефективним інструментом, що дозволяє швидко і детально дослідити стан навколишнього середовища, активізувати процес вивчення і використання природних ресурсів, вирішувати задачі метеорології та сільського господарства, отримувати об'єктивну картину світу. Зокрема за останні роки в області обробки мультиспектральних знімків одними з пріоритетних завдань залишаються прогнозування погодних умов, оцінка ризику повеней, пожеж, зсувів, а також оцінка збитків при надзвичайних ситуаціях.

З появою у вільному доступі великих об'ємів різноманітних супутникових даних (як оптичних, так і радарних) розпочалась нова фаза розвитку спостережень Землі з космосу на сучасній технологічній основі, основною відмінністю якої став запуск масштабних інноваційних проектів супутникового моніторингу. З іншого боку, розвиток мережевих технологій і вдосконалення засобів передачі даних створили основу для побудови Web-орієнтованих систем аналізу зображень. Проте їх практична реалізація вимагає опрацювання значних обсягів інформації. Тому для зниження обчислювальних витрат доцільно застосувати сучасні технології віртуалізації і хмарних обчислень, комбіновані моделі зображень та алгоритми їх обробки. Очевидно, що навіть порівняно з Грід-системами, хмарні сервіси є більш лаконічним, продуктивним і дешевшим рішенням. Все це визначає актуальність теми дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ОБРОБКИ ТА ІНТЕГРАЦІЇ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНИХ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ

2.1 Виділення інформативних ознак на супутникових знімках для розв’язання прикладних задач

Для забезпечення сталого розвитку міських територій при надзвичайно високому темпі розвитку міської інфраструктури потрібно отримувати регулярну і достовірну інформацію про стан і динаміку змін всіх типів об’єктів, в тому числі рослинних і водних [51, 53, 82]. В даний час контроль антропогенних змін рослинності і водних об’єктів великих міст є однією з найбільш важливих і актуальних завдань екологічного моніторингу міст в усьому світі.

Автоматичному виділенню рослинності і водойм за супутниковими знімками присвячено досить багато публікацій останніх років, в тому числі і в вітчизняних виданнях, наприклад [51, 53, 82]. Але в переважній більшості статей в основному описані приклади з використанням багатоспектральних даних низького і середнього просторового розрізнення, а також даних аерозйомки. З метою більш широкого впровадження в прикладну сферу технологій обробки даних ДЗЗ в дисертаційному дослідженні розвиваються методи обробки даних з сучасних супутників надвисокої роздільної здатності.

Для регулярного оновлення баз просторових даних при актуалізації карт мегаполісів традиційно використовувалися дані наземних вимірювань і аерофотозйомки. При цьому періодичність оновлення карт міст була низькою (зазвичай один раз в декілька років), що було обумовлено високою трудомісткістю збору і обробки даних. В умовах посиленої урбанізації завдання підвищення оперативності та достовірності оновлення карт мегаполісів стає ще більш важливим.

В даному розділі запропоновано метод моніторингу рослинності і водойм на території міст за супутниковими знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та ІЧ-діапазонів, що дозволяє підвищити оперативність і достовірність

оновлення карт міських агломерацій. Отримані результати порівнюються з результатами візуального дешифрування [83-85].

Для розв'язання цієї задачі пропонується алгоритм з наступними основними кроками (Рис. 2.1- 2.3).

- попередня обробка супутникових знімків, що включає орторектифікацію і підвищення просторового розрізнення (Рис. 2.2);
- тематична обробка супутникових знімків, що включає розрахунок спектральних індексів, бінаризація, морфологічна фільтрація (Рис. 2.3);
- векторизація розпізнаних рослинних і водних об'єктів (Рис. 2.3);
- визначення точності автоматизованого розпізнавання рослинних і водних об'єктів.

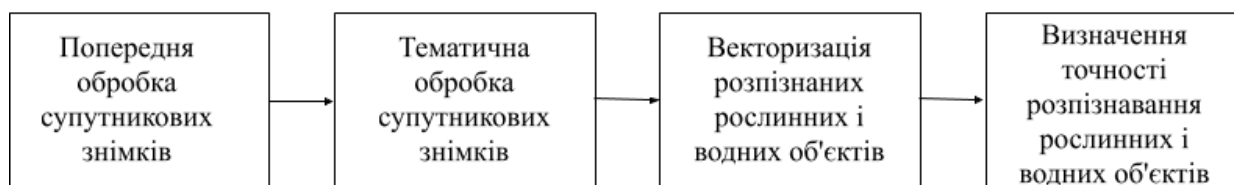


Рисунок 2.1 — Етапи алгоритму обробки мультиспектральних супутникових зображень та моніторингу міських агломерацій

2.1.1 Підходи до оцінки точності

При розв'язанні задачі моніторингу міських агломерацій для оцінки точності класифікації супутникових знімків пропонується використати наступні підходи [84, 85]:

- співставлення результатів класифікації даних ДЗЗ з результатами синхронних наземних спостережень і вимірювань, отриманих безпосередньо під час супутникової зйомки (або з невеликим часовим інтервалом);
- порівняння з результатами автоматичної класифікації цих же даних, отриманих за допомогою сертифікованих програмних пакетів по обробці супутникових знімків (проте при цьому складно або неможливо оцінити точність самого еталона);

- порівняння з результатами ручної класифікації за участю експерту, отриманими операторами і оціненими експертною групою (цей метод може бути використаний для порівняно невеликих обсягів даних або для обмеженого набору тестових областей, які повинні бути рівномірно розподілені на досліджуваній території).

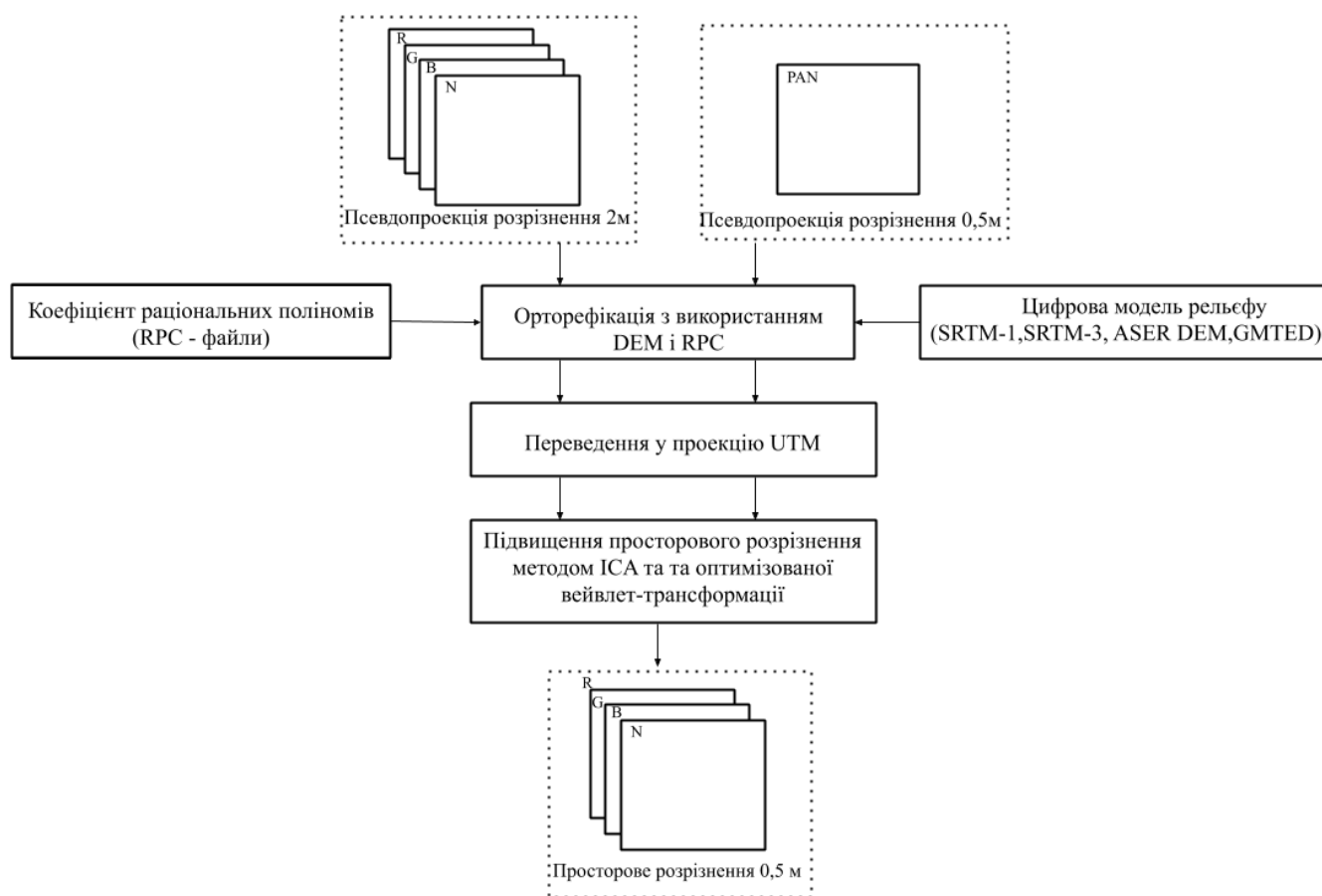


Рисунок 2.2 — Воркфлоу попередньої обробки супутникових знімків до рівня L2

Зважаючи на часту відсутність даних наземних вимірювань для досліджуваної території, у роботі для оцінки точності класифікації використано останній з перерахованих вище методів, а саме, порівняння результатів автоматичної класифікації з результатами класифікації за участю експерту. При цьому експертна оцінка помилки точності класифікації в середньому склала 3-5% для рослинних об'єктів і 2-3% — для водних.

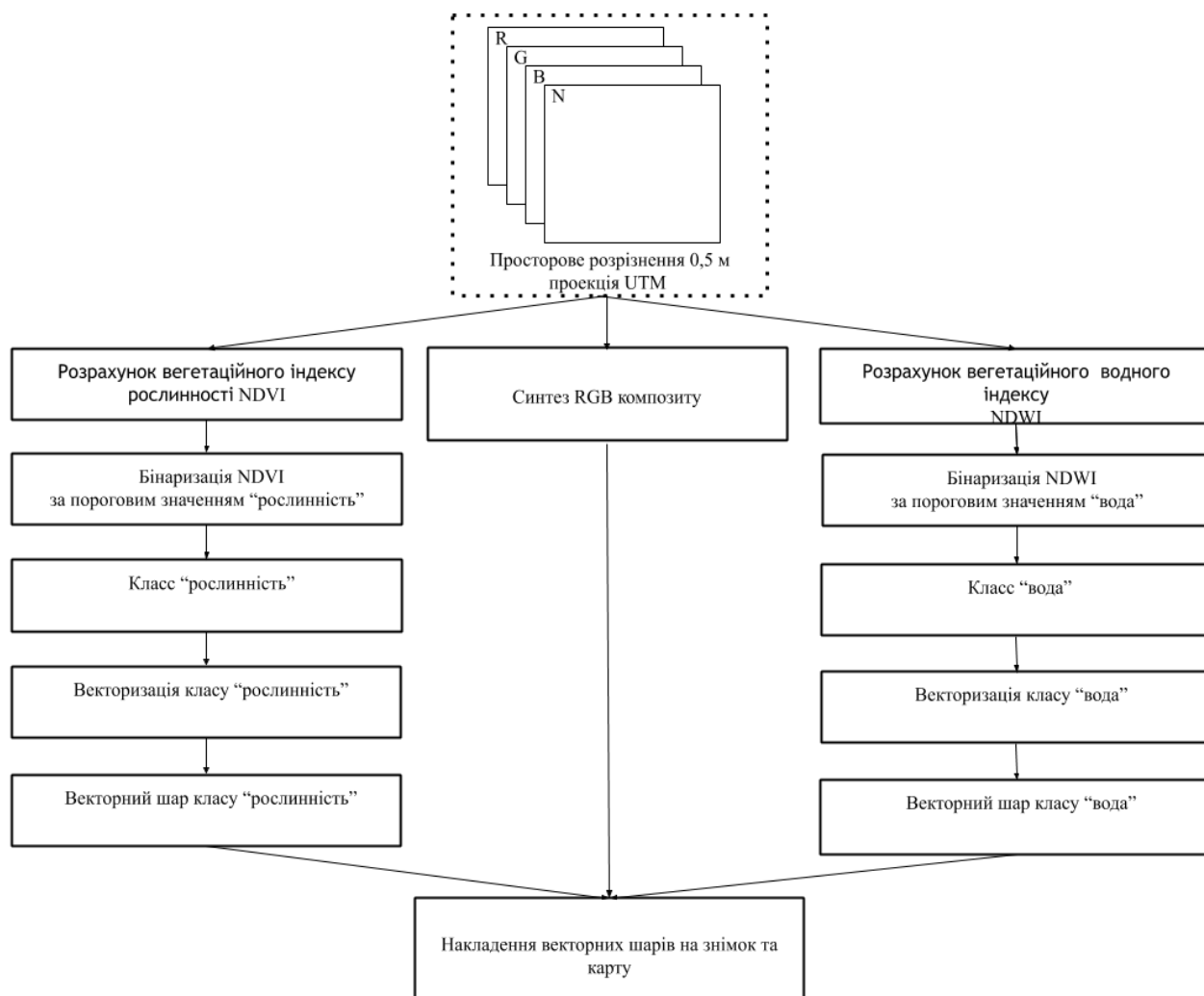


Рисунок 2.3 — Воркфлоу тематичної обробки супутникових знімків

Для оцінки точності класифікації міських агломерацій можуть бути використані наступні метрики [84-86]:

- матриця помилок класифікації для одного класу, що дозволяє визначити кількість нерозпізнаних пікселів класу, кількість помилково розпізнаних пікселів класу, а також загальну точність класифікації [86];
- матриця відповідностей для декількох класів.
- статистичні показники (наприклад, коефіцієнт Каппа, який вираховується по матриці відповідностей).

В даному дисертаційному дослідженні в якості основних кількісних показників точності класифікації були обрані матриця відповідностей для двох класів (вода і рослинність) і коефіцієнт Каппа [87].

2.1.2 Проведення експериментів

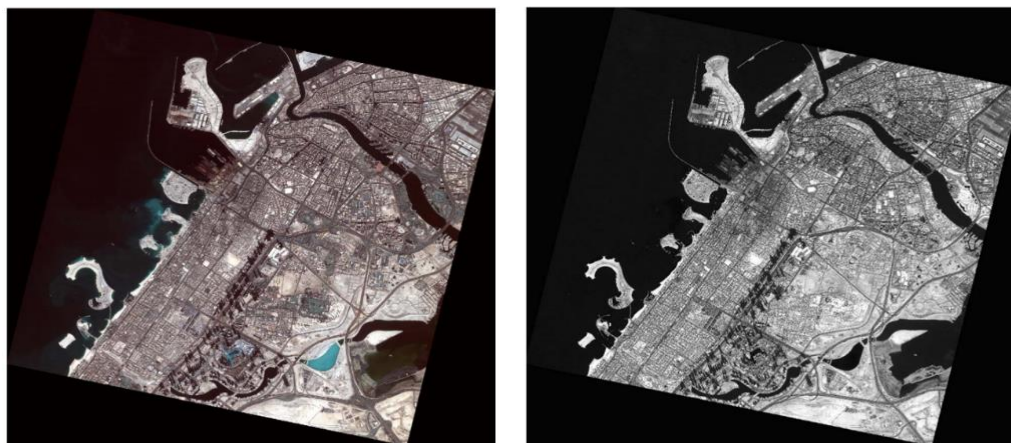
Оскільки задачі моніторингу агломерацій вимагає високої деталізації зображень, для її розв'язання використано супутникові зображення DubaiSat2 з високим просторовим розрізненням. Для відпрацювання методології автоматизованого розпізнавання рослинності і водних об'єктів в якості тестової ділянки була обрана територія міста Дубай (Рис. 2.4), одного з найбільших мегаполісів Об'єднаних Арабських Еміратів. Це місто відрізняється дуже високими темпами змін міської інфраструктури (будівлі, дороги, парки, пляжі тощо), наявністю районів як з висотною, так і з малоповерховою забудовою, а також великою кількістю різноманітних промислових і культурних об'єктів.

В якості вихідних даних були обрані зображення надвисокого просторового розрізнення, зняті супутником DubaiSat2 22 грудня 2015 р. (Рис. 2.5).



Рисунок 2.4 — Територія зйомки

При обробці вихідних багатоспектральних знімків з супутника DubaiSat2 були отримані RGB зображення підвищеного розрізнення (Рис. 2.6, *a*). Для підвищення точності класифікації було використано також індексні зображення NDVI і NDWI (Рис. 2.6).



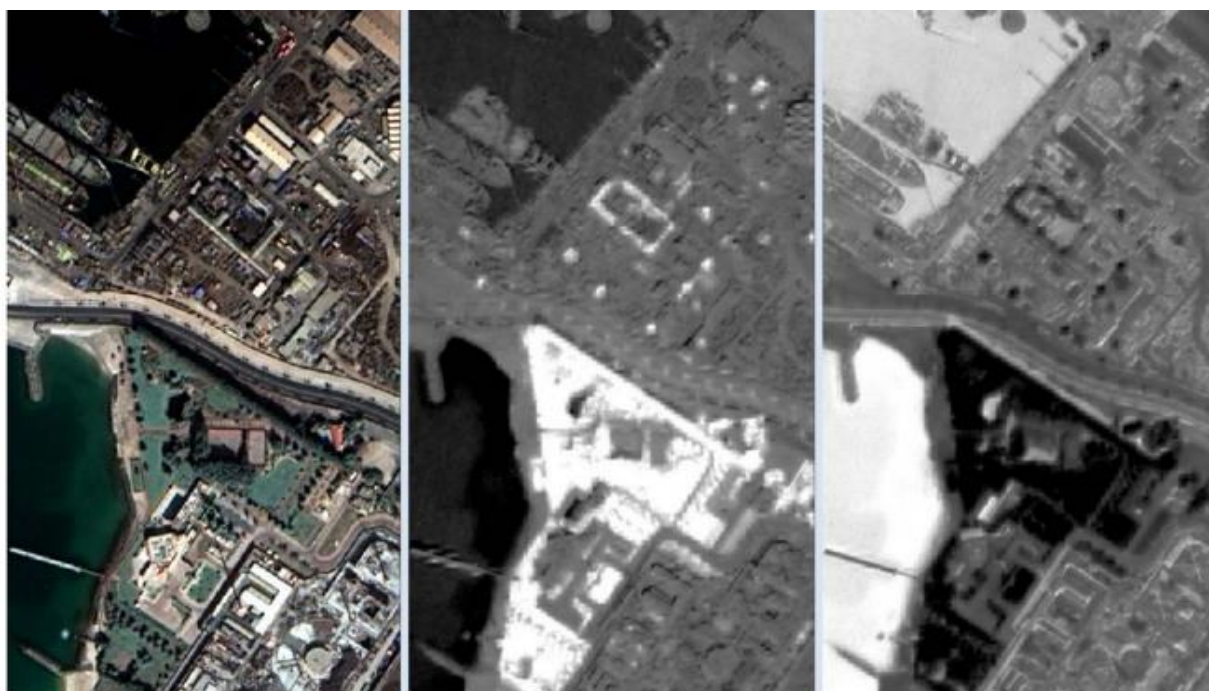
а)

б)

Рисунок 2.5 — Супутникове зображення DubaiSat2:

а) видимий діапазон;

б) ІЧ-діапазон



а)

б)

в)

Рисунок 2.6 — Супутникове зображення DubaiSat2:

а) фрагменти покращеного RGB-зображення;

б) зображення вегетаційного NDVI;

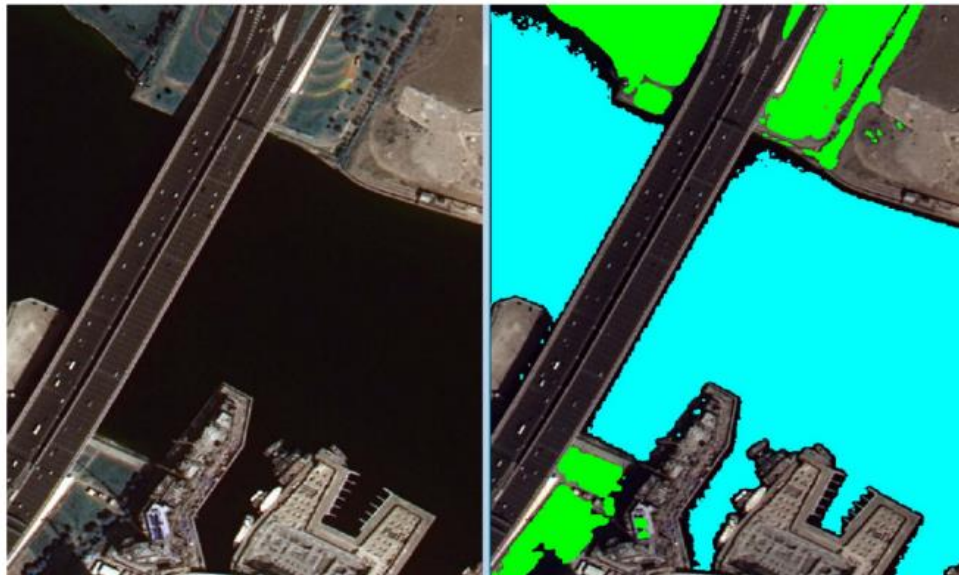
в) зображення вегетаційного NDWI

В результаті бінаризації, морфологічної фільтрації і векторизації індексних зображень були отримані векторні шари розпізнаних рослинних і водних об'єктів (Рис. 2.7). При цьому точність автоматичної класифікації для різних тестових ділянок склала 86–93%, а значення коефіцієнта Каппа були в межах діапазону від 0.71 до 0.85.

Аналіз результатів обробки знімків показав досить високу точність виділення меж розпізнаних об'єктів і хорошу роздільність класів рослинності і води на різних тестових ділянках при одних і тих же налаштуваннях заданих порогів бінаризації. Але слід зазначити, що на затінених ділянках все ж спостерігалось незначне помилкове виділення води (Рис. 2.7), а також помилкове виділення рослинності (Рис. 2.8). Це може бути пов'язано з сезонним цвітінням води.

Основні переваги запропонованого методу в порівнянні з наземними методами вимірювань і аерофотозйомкою полягають в наступному:

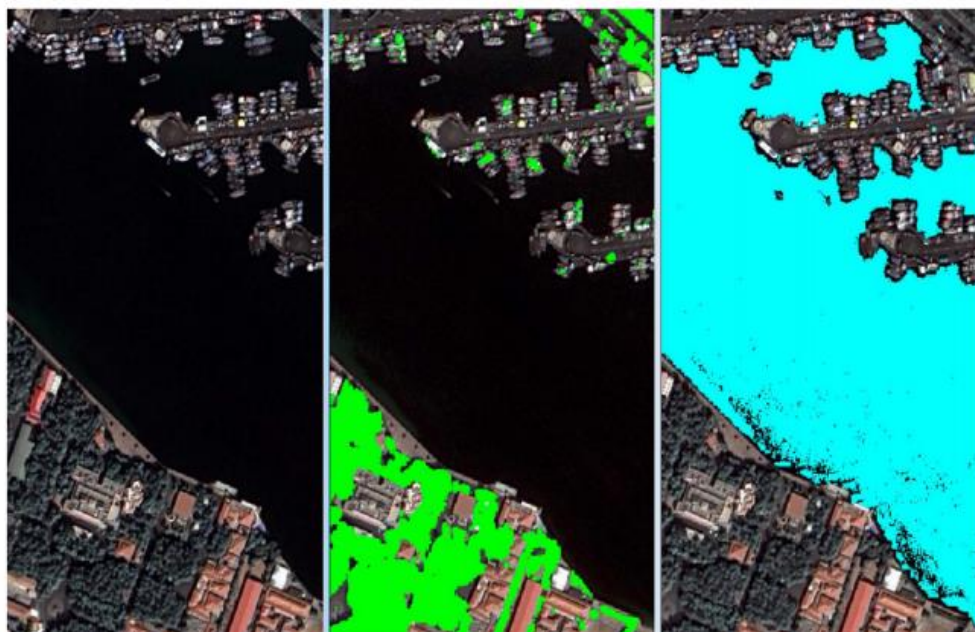
- широка оглядовість (можливість зйомки великих територій);
- висока оперативність (виконання зйомки і обробка займають менше 1 доби);
- мінімізація суб'єктивних похибок (можливість досягнення високого ступеня автоматизації процедур обробки);
- максимальна достовірність (мінімізація помилок і виключення фальсифікації);
- висока періодичність (можливість здійснювати зйомку з періодичністю до декількох разів на добу);
- повна безпека (можна проводити моніторинг, не контактуючи при цьому з небезпечним об'єктом, виключаючи ризики для здоров'я і життя людей);
- максимальна доступність (можна знімати об'єкти, які розташовуються в важкодоступних місцях);
- висока деталізація, достатня для розв'язання більшості прикладних задач;
- синхронність отримання даних (одночасне спостереження за великою кількістю об'єктів, розташованих на значній відстані один від одного);
- висока економічна ефективність (істотне скорочення витрат, особливо при використанні для надання результатів моніторингу спеціалізованих Web-сервісів).



а)

б)

Рисунок 2.7 — Приклад автоматизованого розпізнавання рослинних і водних об'єктів: а) RGB знімок (покращений); б) результат автоматизації



а)

б)

в)

Рисунок 2.8 — Приклад помилкового виділення рослинності: а) RGB знімок (покращений); б) визначення рослинності; в) визначення води

Як правило, файли мультиспектральних знімків надвисокого просторового розрізнення мають досить великий розмір (наприклад, одна сцена видимого і ІК-діапазону може займати кілька ГБайт). Тому для оперативної обробки таких знімків в реальному часі бажано використовувати сучасні комп'ютери з багатоядерними процесорами класу Intel I7 або вище і об'ємом оперативної пам'яті не менше 64 ГБайт. Програмне забезпечення може бути як платним (ERDAS, ENVI, ArcGIS і т.д.), так і з відкритим кодом (SNAP, SAGA, GRAS, QGIS і т.д.), які працюють як в середовищі MS Windows, так і в середовищі Linux.

Для забезпечення більшого ступеня автоматизації процедур обробки можливе використання відповідних інструментів (наприклад, Imagine Model Maker в пакеті ERDAS, Graph Builder в пакеті SNAP) або мов програмування (Наприклад, IDL в пакеті ENVI, Python + GDAL в системі QGIS). В той же час найбільш технологічні підходи до реалізації запропонованих вище методів базуються на використанні як окремих програмних модулів, які можуть бути об'єднані в межах інтегрованого потоку виконання, так і реалізації засобів обробки у хмарному середовищі. Інформаційні технології, що запропоновані у даному дисертаційному дослідженні, розглядаються у розділі 4.

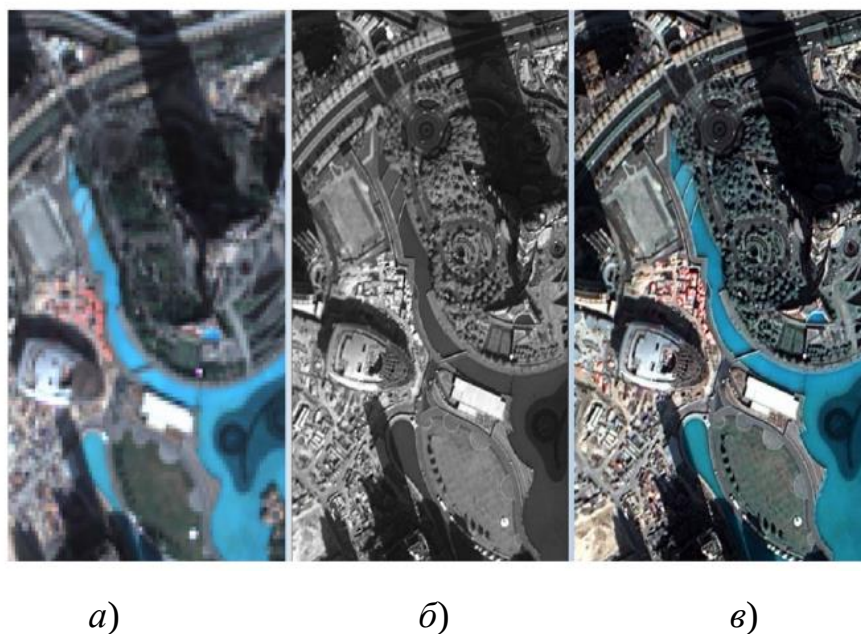


Рисунок 2.9 — Фрагменти вихідних знімків і результат підвищення розрізнення:
а) RGB-знімок (вихідний); б) PAN-канал (вихідний); в) RGB-канали (результат)

2.2 Метод підвищення деталізації об'єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ICA, HSV та вейвлет-перетворень

Для багатьох задач моніторингу на основі багатоспектральних даних використовуються дані з недостатньо високою роздільною здатністю. Тому підвищення інформативності багатоканальних зображень є на сьогодні актуальною задачею. В подальшому це забезпечить більш якісне та оперативне розпізнавання та моніторинг складних об'єктів (військової техніки, споруд, будівель та ін.). Для вирішення цієї задачі можуть бути використані методи злиття (pan-sharpening [88-90], fusion [91-93]) зображень різних спектральних каналів.

Відомі методи підвищення просторового розрізнення багатоканальних зображень, зокрема Грама-Шмідта, Брові, PCA [71, 94], аналіз незалежних компонент (ICA) [77, 78, 93], IHS-алгоритм [71] та ін., не враховують особливості побудови сучасних скануючих пристроїв, відповідних структур і форматів даних скануючих систем. Окреме застосування зазначених підходів в тій чи іншій мірі призводить до спотворення кольорів первинних зображень. Причиною таких спотворень є той факт, що існуючі алгоритми головним чином розроблялися для об'єднання зображень супутника SPOT. На відміну від відповідних характеристик зазначеного космічного апарату довжина панхром-хвилі сучасних супутників (IKONOS, QuickBird, Worldview-2, Worldview-3 та ін.) [95, 96] була розширена від видимого до ближнього інфрачервоного діапазону. Крім того, сучасні сканерні системи є більш досконалішими та мають більше чотирьох каналів (наприклад WorldView— 8 каналів). Тому існуючі методи є неефективними, і виникає необхідність у розробці способу, що дозволяє підвищити інформативність аерокосмічної багатоканальної зйомки без кольорових спотворень з урахуванням фізичних механізмів фіксації видової інформації.

При використанні процедури злиття зображень просторове розрізнення багатоканального зображення може бути підвищене в результаті послідовного виконання наступних основних етапів.

- Перетворення багатоканального зображення низького просторового розрізнення з базису червоний-зелений-синій (RGB) в будь-який трьохкоординатний базис, в якому одна з координат еквівалентна розподілу яскравості.
- Підвищення частоти дискретизації перетвореного зображення до частоти дискретизації панхроматичного знімка і подальша інтерполяція (лінійна, бікубічна, за правилом найближчого сусіда і т.д.).
- Заміна яскравісної компоненти перетвореного зображення панхроматичним, зображенням високого просторового розрізнення.
- Зворотне перетворення в базис RGB.

Для розв'язання цієї задачі запропоновано удосконалення методу підвищення інформативності та деталізації об'єктів багатоспектрального зображення на основі ІСА та вейвлет-перетворення [69, 76, 95, 97]. В роботі пропонується застосовувати вейвлет-перетворення (причому вирішується оптимізаційна задача знаходження коефіцієнтів лінійних форм суміщення) не до всього кольорового зображення, а лише до яскравісної компоненти після переведення первинного зображення до кольорового простору HSV. Основним загальною блок-схема алгоритму наведена на рис. 2.10.

Першим кроком нової технології є завантаження фотограмметричних сканерних зображень, наприклад, отриманих з супутника WorldView-2, а саме:

- панхроматичного;
- багатоканального у кольоровому просторі RGB із зазначенням наступних каналів 5, 4 та 2 відповідно. Оскільки панхроматичне зображення просторово відрізняється від багатоканального проводимо масштабування багатоканального зображення до розмірів панхроматичного методом лінійної інтерполяції.

Характерною рисою багатьох зображень, отриманих за допомогою реальних сканерних систем, є суттєва питома вага темних ділянок і порівняно мале число ділянок з високою яскравістю. Саме тому одним із перших кроків алгоритму є проведення еквалізації гістограми зображень, оскільки дана процедура забезпечує вирівнювання інтегральних площ рівномірно розподілених діапазонів яскравостей.

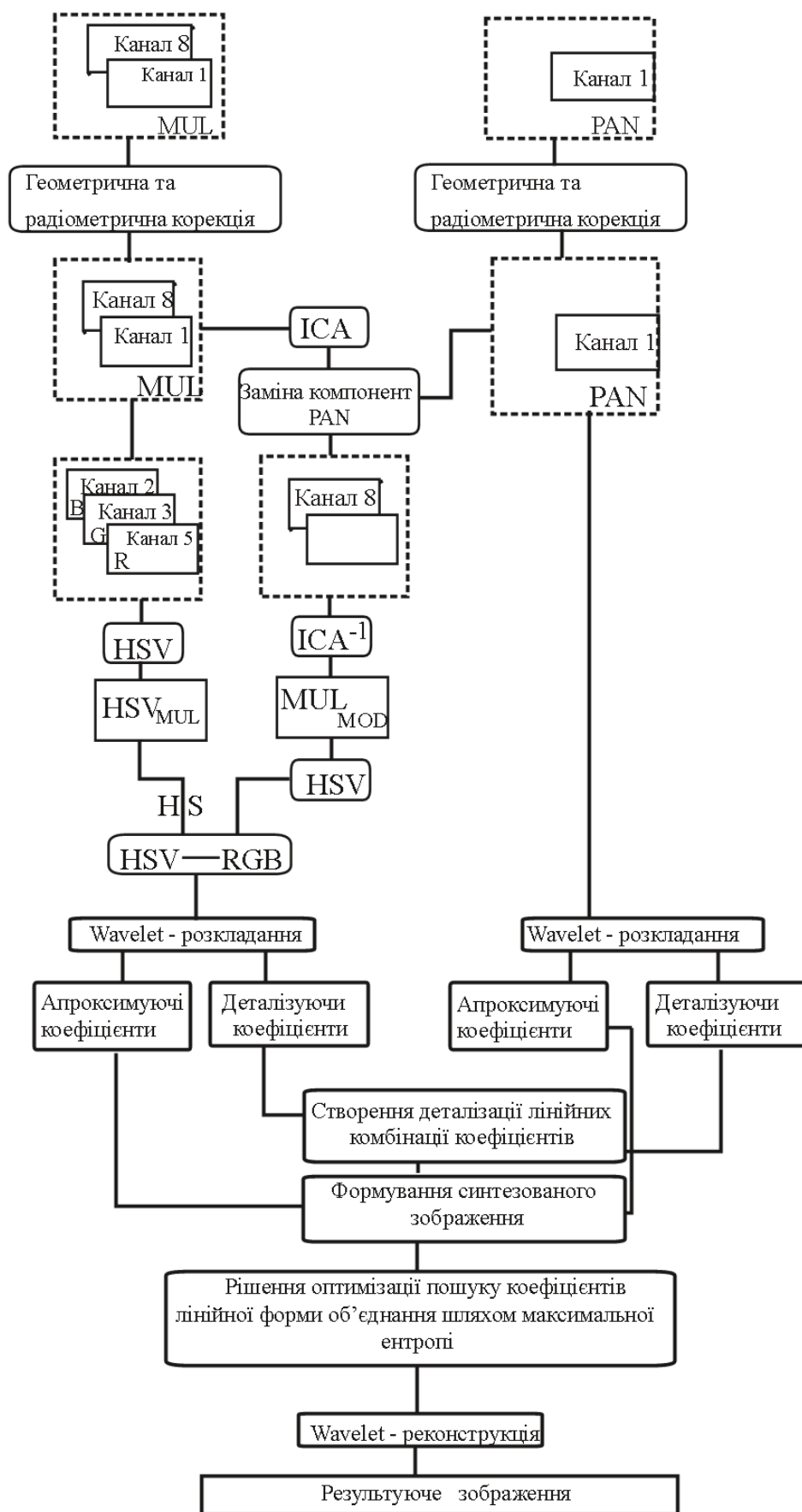


Рисунок 2.10 — Блок-схема методу підвищення інформативності і деталізації об'єктів на багатоспектральних зображеннях

Дискретне перетворення шкали яскравості має наступний вигляд:

$$z'_i = z_m \sum_{k=0}^i p(z_k) , \quad (2.1)$$

де z'_i — значення елемента перетвореної шкали яскравостей, що відповідає яскравості вихідної шкали, $p(z_k)$ — нормалізована гістограма яскравості вихідного зображення ($k = 0 \dots 255$). В результаті еквалізації частина гістограми яскравості вихідного зображення, в якій сусідні яскравості мають великі значення $p(z)$, розтягується за рахунок злиття тих областей гістограми, в яких сусідні яскравості мають низькі значення $p(z)$.

У попередніх дослідженнях визначено, що одним з найбільш перспективних і потужних математичних апаратів для злиття аерокосмічних зображень є вейвлет-перетворення [71, 97, 98]. Але окреме застосування вейвлет-перетворення часто призводить до артефактів у синтезованому зображенні. Для того, щоб уникнути цієї проблеми, у роботі запропоновано вейвлет-перетворення отриманої кольорової моделі HSV.

Спочатку зазначені зображення піддаються декомпозиції першого рівня, у результаті чого для кожного із зображень отримують матриці апроксимуючих та деталізуючих коефіцієнтів; отримані деталізуючі коефіцієнти обох зображень утворюють лінійні комбінації з урахуванням чисельних значень коефіцієнтів лінійних форм суміщення (a, b), тобто [97]:

$$\begin{cases} App_i^N = c_i^N, \\ Det_i = \sum_{l=1}^N (\{a \cdot d_p^{l,1} + b \cdot d_p^{l,1}\}, \{a \cdot d_p^{l,2} + b \cdot d_p^{l,2}\}, \{a \cdot d_p^{l,3} + b \cdot d_p^{l,3}\}), \end{cases} \quad (2.2)$$

де App_i^N та Det_i — апроксимуючі та деталізуючі вейвлет-складові нового БСЗ. Нижнім індексом позначено відповідний канал БСЗ ($i = \{R, G, B\}$) або панхроматичного зображення (P). Далі виконується вейвлет-реконструкція першого рівня. Вхідними даними для здійснення вейвлет-реконструкції є апроксимуючі коефіцієнти, отримані після вейвлет-декомпозиції синтезованого кольорового зображення, які беруться без змін, та в якості деталізуючих коефіцієнтів використовуються утворені лінійні комбінації. Далі відбувається пошук аргументів, які представляють собою коефіцієнти лінійних форм суміщення, при яких ентропія

для нового синтезованого зображення досягає максимальних значень. Таким чином, в результаті вейвлет-реконструкції отримується зображення, синтезоване за допомогою вейвлетів, що представляє собою багатоканальне зображення з підвищеною інформативністю за максимізації функції ентропії. Експериментальним шляхом було встановлено, що найбільш ефективним є використання вейвлетів Добеші не нижче шостого порядку.

При зворотному переведенні з кольорового простору HSV у кольоровий простір RGB, обираємо компоненти H і S багатоканального зображення та отриману компоненту V після вейвлет-перетворення.

У роботі [78] доведено, що використання методу аналізу незалежних компонент, як одного з кроків технології, призводить до підвищення інформативності багатоканального зображення. Отже останнім кроком технології підвищення інформативності та деталізації об'єктів є застосування методу аналізу незалежних компонент. Аналіз незалежних компонент розглядається саме як розширення аналізу головних компонент на задачу сліпої сепарації незалежних джерел з їх лінійних сумішей. Як відомо, з аналізом головних компонент тісно пов'язані такі поняття, як некорельованість і гаусівський (нормальний) характер розподілу даних, в той час як ІСА пов'язаний зі статистичною незалежністю і негаусівським розподілом. Крім того, осі не обов'язково повинні бути ортогональними. Модель, яка використовується в аналізі незалежних компонент, можна представити у наступному вигляді [77, 78, 93]:

$$y = Hx, \quad (2.3)$$

де y — m -вимірний випадковий вектор, x — n -вимірний випадковий вектор з незалежними компонентами, H — деяке невідоме відображення $Rn \rightarrow Rm, m \geq n$.

У методі підвищення інформативності та деталізації об'єктів, пропонується заміна після перетворення ІСА першої компоненти багатоканального зображення панхроматичним зображенням після еквалізації. Наступним етапом після заміни є зворотне перетворення ІСА.

Для практичної верифікації запропонованого методу був проведений експеримент з панхроматичним та багатоканальним зображеннями, отриманими зі

супутника WorldView-2 (Рис. 2.11). Вхідними даними запропонованого алгоритму є 8-смугове багатоспектральне (MUL) та 16-бітне панхроматичне (PAN) зображення, надані компанією DigitalGlobe. Панхроматична смуга має просторову роздільну здатність 0,46 м. Багатоспектральні смуги, кожна з просторовим розрізненням 1,84 м: крайовий-синій (400–450 нм), синій (450–510 нм), зелений (510–581 нм), жовтий (585–625 нм), червоний (630–690 нм), червоний край (705–745 нм), NIR1 (770–895 нм) та NIR2 (860–1040 нм). У запропонованому методі синтез при перетворенні у кольорову модель HSV обираємо лише три смуги $R = 5$, $G = 3$ і $B = 2$. Фрагменти оригінальних зображень показані на Рис. 2.11. Зображення MUL мають розмір 512×512 пікселів, тоді як зображення PAN має розмір 2048×2048 пікселів. Образи повинні бути перетворені до однакового розміру перед застосуванням синтезу техніка. Для цього MUL-зображення, яке має розмір 512×512 пікселів, збільшується в 4 рази до розміру 2048×2048 пікселів за допомогою бікубічної інтерполяції.

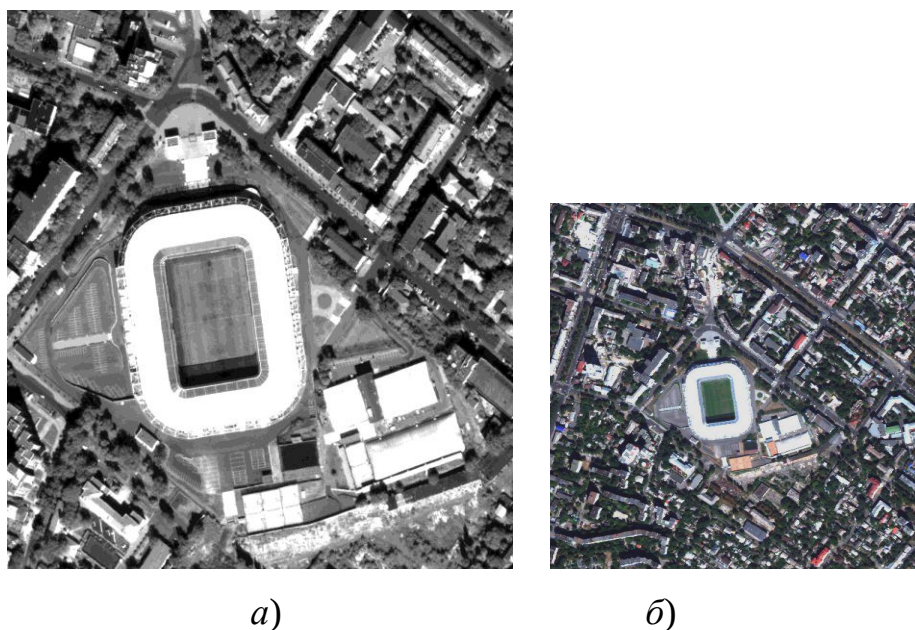


Рисунок 2.11 — Зображення супутника WorldView-2:

а) панхроматичне; б) багатоканальне

Наступним кроком є переведення панхроматичного та багатоканального зображення у компоненти кольорового простору HSV, що відповідають тону, насиченості та інтенсивності.

Переведення RGB зображення у кольорову модель HSV здійснено не за класичними співвідношеннями, а наступним чином [98]:

$$\begin{bmatrix} V \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, H = \arctg \left[\frac{V_2}{V_1} \right], S = \sqrt{(V_1)^2 + (V_2)^2} . \quad (2.4)$$

Така модифікація дозволяє уникнути спектральних спотворень. На Рис. 2.12 представлено синтезоване зображення після роботи нової технології підвищення інформативності на основі ІСА та вейвлет-перетворень. Треба зазначити, що отримане синтезоване зображення навіть візуально відрізняється від первинного багатоканального зображення більшою чіткістю та деталізацією об'єктів. Методи декореляції просторових розподілів яскравості базуються на обчисленні статистичних параметрів цифрових зображень, визначення яких утруднено при великих обсягах первинних даних. При використанні таких методів враховується лише внесок спектральної інформації, що міститься в первинних багатоканальних зображеннях.



Рисунок 2.12 — Приклад зображення, отриманого з використанням запропонованого методу підвищення інформативності багатоспектральних даних

2.3 Оцінювання точності підвищення інформативності та деталізації багатоспектральних зображень

На рис. 2.13 наведені фрагменти зображень, отримані різними методами злиття, за якими проводиться оцінка точності [73, 99].

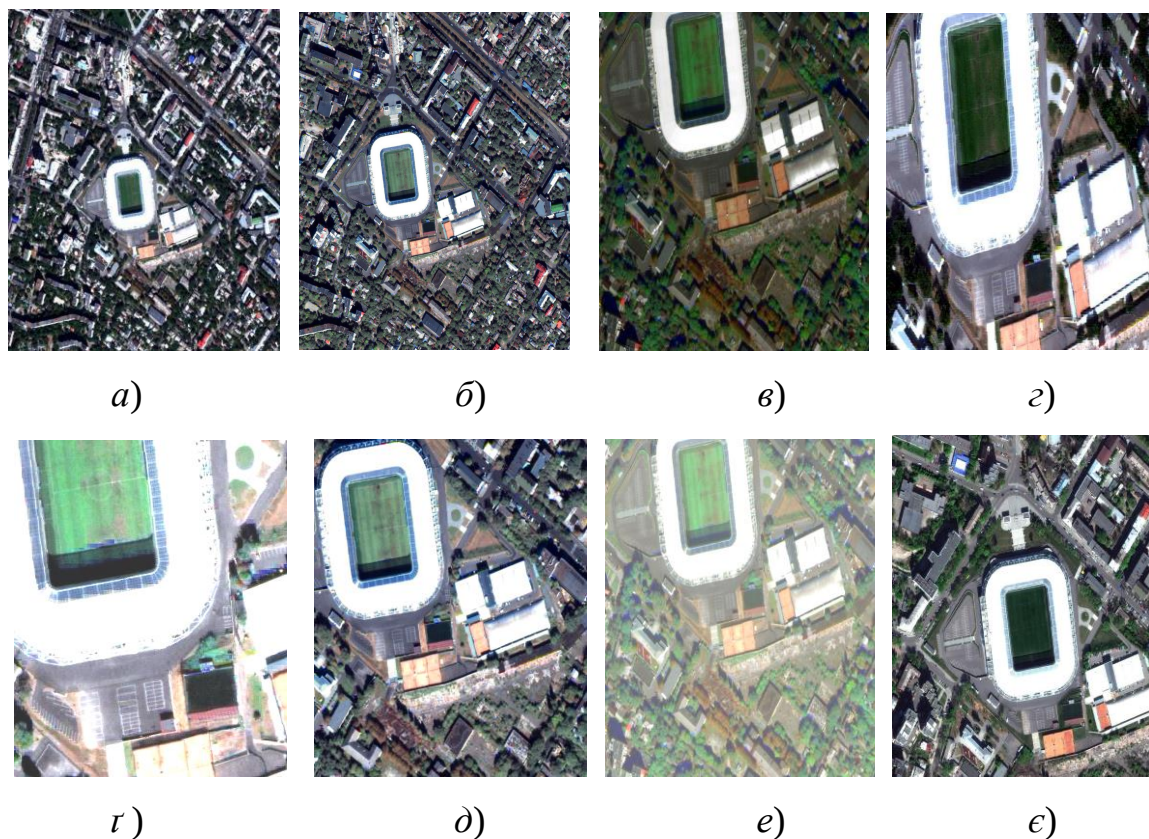


Рисунок 2.13 — Результати різних класичних методів злиття:

a) вхідне RGB-зображення; *б)* запропонований метод; *в)* Brovey;

г) Gram-Schmidt; *г)* PCA [114]; *д)* ICA; *е)* HSV; *е)* вейвлет-перетворення

З метою визначення впливу удосконаленого методу на якість багатоканального зображення у роботі отримано кількісні оцінки інформативності первинного та синтезованого багатоканального зображень, а саме: інформаційна ентропія, *RMSE*, *RASE*, *SSIM*, *ERGAS*, *CC* та інші [99-102]. Візуальну «якість» зображення можна оцінити за критеріями максимуму характеристик інформативності, до яких відноситься інформаційна ентропія:

$$E(x) = - \sum_{k=0}^{N-1} p_k \cdot \log_2 p_k, \quad (2.5)$$

де N — кількість рівнів яскравості, p_k — ймовірність появи значення k у знімку, k — рівень яскравості, який належить до інтервалу $[0, 255]$, $\sum_{k=0}^{N-1} p_k = 1$.

У Табл. 2.1 наведено значення інформаційної ентропії для первинного багатоканального та синтезованого зображення за технологією підвищення інформативності на основі ІСА та вейвлет-перетворення. Значення ентропії синтезованого зображення набагато перевищує значення ентропії первинного багатоканального зображення, це свідчить про те що запропонована технологія дозволяє підвищити інформативність та деталізацію об'єктів багатоканальних зображень.

Таблиця 2.1 Значення інформаційної ентропії

Зображення	Ентропія
Панхроматичне	7.129
Мультиспектральне	6.988
Синтезоване методом	7.809

$RMSE$ — це середньоквадратична помилка, обчислена між синтезованим та первинним зображеннями для діапазону k наступним чином:

$$RMSE = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (R(m, n) - F(m, n))^2}, \quad (2.6)$$

де $R(m, n)$, $F(m, n)$ — еталонні та злиті зображення відповідно, M , N — розміри зображення.

Індекс відносної середньої спектральної похибки ($RASE$), виражений у відсотках, характеризує середню ефективність методу в розглянутих спектральних смугах:

$$RASE = \frac{100}{M} \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K RMSE^2(B_i)}, \quad (2.7)$$

де M — середнє випромінювання K спектральних смуг (B_i) вихідних мультиспектральних смуг.

Коефіцієнт кореляції (CC) — це показник подібності, де значення, наближене до одного, ілюструє хорошу схожість між порівняними зображеннями:

$$CC(A, B) = \frac{\sum_{m,n} (A_{m,n} - \bar{A})(B_{m,n} - \bar{B})}{\sqrt{(\sum_{m,n} (A_{m,n} - \bar{A})^2)(\sum_{m,n} (B_{m,n} - \bar{B})^2)}}, \quad (2.8)$$

де $\bar{A}$ і $\bar{B}$ — середні значення відповідного набору даних, а CC обчислюється для всього зображення.

Результат обчислення рівняння (2.8) ілюструє схожість у малих структурах між початковими та зрощеними зображеннями.

Використаємо SSIM для обчислення подібності відповідних областей на двох зображеннях. Він визначається наступним чином:

$$SSIM = \frac{2\mu_A\mu_B}{\mu_A^2 + \mu_B^2} \cdot \frac{2\sigma_A\sigma_B}{\sigma_A^2 + \sigma_B^2} \cdot \frac{\sigma_{AB}}{\sigma_A\sigma_B}, \quad (2.9)$$

де, μ_A , μ_B — середні значення інтенсивності A і B відповідно, σ_A^2 , σ_B^2 — дисперсія A і B відповідно, σ_{AB} — коваріація A і B .

При визначенні «візуальної» якості синтезованого зображення можна використати відносну безмірну глобальну помилку (ERGAS), яка дозволяє обчислити «кількість» спектральних спотворень фотограмметричних сканерних зображень. Індекс ERGAS дорівнює нулю при умові, що отриманий шляхом злиття знімок співпадає з оригінальним знімком. Тому низький індекс ERGAS показує високу якість методу злиття.

$$ERGAS = 100 \frac{h}{l} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \left(\frac{RMSE(n)}{\mu(n)} \right)^2}, \quad (2.10)$$

де h — просторове розрізнення зображення з високим просторовим розрізненням; l — просторове розрізнення зображення з низьким просторовим розрізненням; N — кількість спектральних каналів, які використовуються; $\mu(n)$ — середнє значення каналу n еталонного зображення; $RMSE$ — середньо-квадратична помилка, отримана шляхом злиття зображення та оригінального зображення для каналу n .

У Табл. 2.2 наведено значення відносної безмірної глобальної помилки ERGAS для зображень, отриманих відомими методами злиття (PCA, Grama-Shmidt, HSV, Wavelet) і синтезованого зображення за розробленою технологією.

Таблиця 2.2 Порівняння методів злиття

Метод	$E(x)$	$E(x)$ сигн	ERGAS	RASE	RMSE	CC	SSIM
PCA	5.01	7.119	10.06	20.08	2.21	0.32	0.66
Brovey	4.96	6.685	9.12	11.06	3.35	0.53	0.46
Gram-Schmidt	6.05	7.067	3.54	10.32	1.85	0.67	0.83
ICA	5.66	7.195	4.68	8.86	3.03	0.51	0.74
Wavelet	5.89	7.547	3.31	14.21	1.69	0.89	0.96
Запропонований	6.12	7.809	2.23	6.73	1.52	0.93	0.98

Отримані кількісні оцінки свідчать про те, що обробка багатоканальних геопросторових даних за допомогою удосконаленого методу підвищення інформативності на основі ICA та вейвлет-перетворення призводить до покращення якісних і кількісних показників мультиспектральних зображень. Оскільки після застосування запропонованого підходу суттєво покращується деталізація об'єктів, подальші дослідження будуть присвячені розробці алгоритмів розпізнавання та класифікації складних об'єктів за багатоканальними зображеннями [103-106].

2.4 Висновки до другого розділу

Даний розділ присвячено розробці методів попередньої обробки супутникових даних та потоку робіт (воркфлоу), що можуть бути застосовані для перетворення супутникових зображень до рівня L2. Запропонований вкркфлоу включає відомі процедури попередньої обробки, методи видалення хмарності і корекції рельєфу, а також забезпечує підвищення якості вхідних зображень.

1. Удосконалено метод і розроблено автоматизовану інформаційну технологію (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних на основі злиття даних та

продуктів їх обробки з різних джерел. Розроблений воркфлоу є робастним і забезпечує можливість розв'язання широкого класу прикладних задач на основі уніфікованих даних рівня L2, оскільки включає повний перелік можливих етапів попередньої обробки супутникових даних, включаючи видалення хмар і корекцію рельєфу, а також застосовний для всіх відомих на сьогодні супутників. Запропоновано підходи до перевірки точності результатів класифікації супутникових зображень з урахуванням обмеженості наземних датасетів.

2. Перевірку ефективності методів попередньої обробки здійснено на прикладі задачі моніторингу рослинності і водойм на території міст за супутниковими знімками надвисокого просторового розрізнення видимого та ІЧ-діапазонів. Розроблено відповідний метод моніторингу рослинності і водойм на території міст, що дозволяє істотно підвищити достовірність карт міських агломерацій при одночасному зниженні фінансових витрат. Завдяки високому ступеню автоматизації та мінімізації необхідних обчислень (в порівнянні з методами, які використовують складні класифікатори та нейронні мережі) розроблена методика може бути реалізована у вигляді геоінформаційного Web-сервісу, функціонуючого як в інтересах широкого кола державних служб і комерційних структур, так і в інтересах населення мегаполісів.
3. Удосконалено метод підвищення деталізації об'єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ICA та оптимізованого вейвлет-перетворення. Удосконалення стосується декількох аспектів. В роботі пропонується застосовувати вейвлет-перетворення (при цьому вирішується оптимізаційна задача знаходження коефіцієнтів лінійних форм суміщення) не до всього кольорового зображення, а лише до яскравісної компоненти після переведення первинного зображення до кольорового простору HSV, причому не за стандартними співвідношеннями. Це дозволило у порівнянні з існуючими підходами, підвищити просторове розрізнення багатоканального зображення без спотворень кольору.
4. Отримала подальший розвиток методологія визначення ефективності методів обробки супутникових багатоканальних зображень. Розглянуто критерій

визначення ефективності методу підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоспектральних зображеннях у вигляді ентропії яскравостей, який, крім власно оцінки, може використовуватися як ефективний інструмент керування при обробці цифрової інформації з метою оптимізації параметрів на різних етапах перетворення зображень, зокрема при вейвлет-декомпозиції.

5. Результати оцінки ефективності підтвердили ефективність запропонованого методу. У той час як інформаційна ємність мультиспектральних зображень, а також контраст і кількість градацій яскравості збільшується із застосуванням запропонованого підходу, кореляція зменшується, що свідчить про збільшення інформаційної ентропії зображень.

Результати даного розділу опубліковано в роботах автора [2, 8, 9, 19, 20, 22, 27].

РОЗДІЛ 3 ХМАРНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

3.1 Актуальність реалізації сервісів супутникового моніторингу в хмарному середовищі AWS

Розвиток комп'ютерних технологій, мереж доступу до інформаційних ресурсів, включаючи мобільні телефони та планшети, призводить до постійного підвищення попиту на оперативну інформацію про наземні об'єкти, природні і техногенні процеси. Викликає інтерес також динаміка зміни природних явищ в часі і їх прогнозування.

Для надання широкого спектру інформаційних послуг, пов'язаних з використанням даних спостереження Землі, єдиним оперативним джерелом отримання інформації в даний час є супутникові дані, що дозволяють оперативно отримувати інформацію для будь-якої точки земної поверхні.

В даний час активно розробляються нові види геоінформаційних Web-сервісів, заснованих на результатах онлайн-обробки супутникових знімків. Ці сервіси орієнтовані на масового користувача, який не має досвіду обробки супутникових знімків і не вимагають використання високопродуктивних суперкомп'ютерів і дорогого спеціалізованого програмного забезпечення. Це є суттєвою перевагою у порівнянні з традиційними високопродуктивними системами обробки даних, такими як GRID-системи чи типові кластерні рішення [107-110]. Саме на реалізацію таких сервісів спрямовано дане дисертаційне дослідження.

Наукові методи, розроблені в попередніх розділах дисертації, ґрунтуються на часових рядах даних високого і надвисокого розрізнення і, відповідно, вимагають обробки великих об'ємів даних. Зараз вже добре відомо, що ефективну операційну реалізацію таких методів можна забезпечити лише в хмарному середовищі, уникаючи зайвих витрат ресурсів на завантаження і збереження знімків на локальних

обчислювальних ресурсах. Платформу для реалізації власних геосервісів надають Amazon, Google, Microsoft та низка європейських провайдерів [111, 112].

Даний розділ присвячено розробці ефективних хмарних інформаційних технологій і систем для реалізації розроблених в попередніх розділах методів.

3.2 Обґрунтування вибору моделі обслуговування PaaS

Існує три основних моделі обслуговування хмарних обчислень:

- програмне забезпечення як послуга (SaaS — Software-as-a-Service) [113],
- платформа як послуга (PaaS — Platform-as-a-Service) [114],
- інфраструктура як послуга (IaaS — Infrastructure-as-a-Service),

а також з'являються додаткові моделі:

- апаратне забезпечення як послуга (HaaS — Hardware as a Service),
- безпека як сервіс (SECaaS — Security as a Service),
- дані як послуга (DaaS — Data as a Service).

Враховуючи той факт, що користувачі геоінформаційних Web-сервісів зазвичай не мають необхідної кваліфікації для самостійного розгортання і підтримки функціонування програмного забезпечення в хмарному середовищі, доцільно розробити прикладне програмне забезпечення тематичної обробки багатоспектральних супутникових зображень на базі хмарної платформи з використанням моделі обслуговування хмарних обчислень PaaS. Дана модель надає споживачам можливість використання хмарної інфраструктури для розгортання базового програмного забезпечення з подальшим розміщенням на ньому нових або існуючих додатків (власних, розроблених на замовлення або придбаних тиражованих додатків). До складу платформи повинні входити інструментальні засоби створення, тестування і виконання прикладного програмного забезпечення, що надаються хмарним провайдером.

Такий підхід дає можливість отримати наступні переваги:

- 1) самообслуговування на вимогу;
- 2) універсальний доступ по мережі;

- 3) об'єднання ресурсів;
- 4) еластичність;
- 5) облік споживання.

У порівнянні з Грід-обчисленнями [114-117], модель хмарних обчислень PaaS надає розробнику прикладного програмного забезпечення та кінцевому користувачеві більш гнучку платформу для роботи з віддаленими обчислювальними ресурсами, що значно зменшує економічні витрати.

Розроблені таким чином Web-сервіси онлайн-обробки супутникових знімків високого просторового розрізнення дозволяють розв'язувати широкий спектр актуальних прикладних задач в наступних сферах:

- сільське, лісове і водне господарство, енергетика і нафтогазовий комплекс;
- екологія та охорона навколишнього середовища, контроль надзвичайних ситуацій;
- землекористування та природокористування;
- транспортна інфраструктура і контроль переміщення транспортних засобів;
- містобудування та муніципальне господарство, картографія, геодезія та кадастр;
- культурно-історичні об'єкти та туризм.

3.3 Технологія обробки знімків в реальному часі на хмарних платформах

Хмарна платформа Amazon представляє собою поєднання високопродуктивних масштабованих обчислювальних ресурсів (Amazon EC2 — Amazon Elastic Compute Cloud) [<https://aws.amazon.com/ec2/>] та об'єктного сховища даних (Amazon S3 — Amazon Simple Storage Service) [<https://aws.amazon.com/s3/>], яке забезпечує масштабоване, надійне та безпечне зберігання даних.

Хмарна платформа Amazon є ефективним рішенням для реалізації потоків обробки (workflow — воркфлоу) супутникових даних у розподіленому режимі. В першу чергу це забезпечується тим, що провайдери супутникових даних зберігають зображення на ресурсах S3. Це дає можливість не виконувати тривалий процес

завантаження даних на локальні обчислювальні ресурси та здійснювати обробку даних напряму та паралельно (проведені експерименти дозволяють стверджувати, що при цьому час доступу до даних у хмарі зменшується на порядок).

У порівнянні з класичною схемою використання геопросторових даних (завантаження знімків, їх обробка та візуалізація) це дозволяє працювати з більшою гнучкістю та для великих територій.

Для підвищення ефективності обробки даних в реальному часі на хмарній платформі пропонується використовувати оптимізований формат GeoTiff (Cloud Optimized GeoTIFF — COG). Передбачається, що файли будуть розміщені на файловому сервері HTTP, при цьому оптимізована внутрішня організація дозволить більш ефективно використовувати його можливості у хмарі. Цього можна досягти за рахунок використання можливостей клієнтів, які генерують запити виду HTTP GET на отримання лише необхідних частин файлу.

Основні вимоги COG полягають у наступному (Рис. 3.1):

- 1) IFD (Image File Directory) та метадані мають зберігатись на першому місці.
- 2) IFD мають бути відсортовані за роздільною здатністю.
- 3) Зображення має внутрішній розподіл по тайлам.

4) Зображення поділяється на піраміди оглядів (внутрішні чи зовнішні). Кожен рівень має нижчу роздільну здатність, ніж попередній. Кожен рівень має внутрішній розподіл по тайлам.

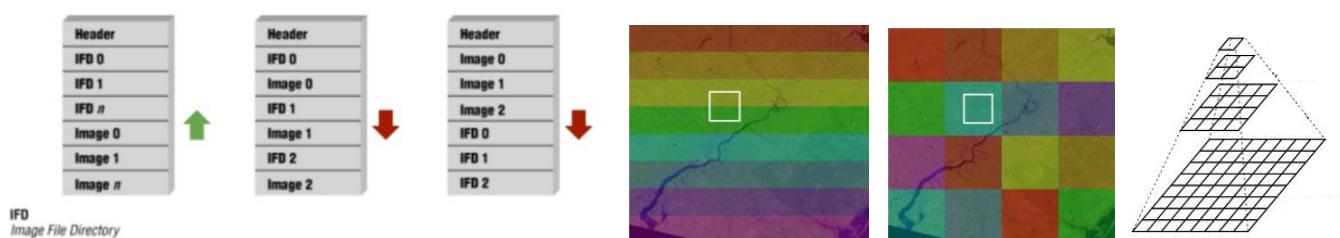


Рисунок 3.1 — Графічне представлення основних вимог COG до зберігання даних

Програмне забезпечення, орієнтоване на COG, може передавати частину потрібних даних, покращуючи час обробки та створюючи робочі процеси в режимі реального часу, що не було можливим до цього. Доступ до COG за допомогою

хмарних потоків обробки дозволяє різному програмному забезпеченню отримувати доступ до одного файлу, уникаючи копіювання та кешування даних. Традиційні GIS-системи можуть працювати з Cloud Optimized GeoTIFF так само, як і зі звичайним GeoTIFF, тому постачальникам даних достатньо надавати лише один формат.

Для підвищення швидкості роботи хмарних сервісів автором запропоновано оптимізований формат зберігання даних. Він передбачає збереження кожного спектрального каналу в окремому файлі, використання стиснення файлів, яке швидко розпаковується, включення підсумкової статистики та чіткі правила іменування файлів. Для створення глобального покриття передбачається використання кількох зображень.

Для того, щоб оптимізувати використання у хмарній платформі формату JPEG2000, необхідно забезпечити виконання наступних вимог (Рис. 3.2).

- 1) Зображення має внутрішній розподіл по тайлам. Кожний тайл розбитий на частини.
- 2) Маркерні сегменти, що описують довжину даних тайлових частин (TLP) та довжину пакетів (PLM, PLT).
- 3) Піраміди. Кілька рівнів декомпозиції надають можливість генерувати зображення нижчої роздільної здатності, ніж оригінал, шляхом вибору підмножини даних.

В процесі дисертаційного дослідження виявлено, що дані Sentinel-2 L1C не оптимізовано для використання в хмарній платформі, оскільки на початку файлу немає даних про зміщення частини тайлу. Отже, щоб отримати ці значення, доводиться аналізувати весь файл.

На рис. 3.3 ілюструється, чому рендеринг Sentinel-2 L1C в форматі JPEG2000 потребує більше часу, ніж рендеринг COG. Сегмент PLT містить зміщення пакетів у тайлі. JPEG 2000 ISO передбачає спеціальний маркер довжини частини тайлу (TLM), який описує довжину кожної частини тайлу в потоці коду. Розміщений перед першим початком сегмента маркер частини тайлу (COT) може значно зменшити кількість запитів HTTP, необхідних для відновлення структури файлу.

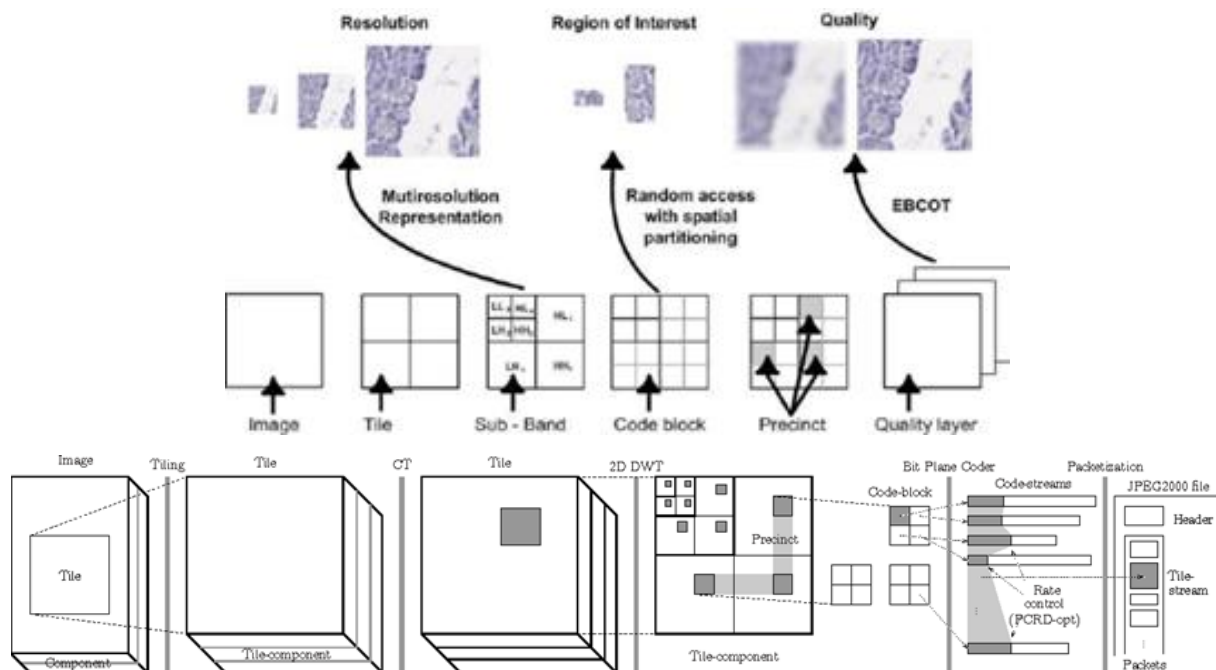
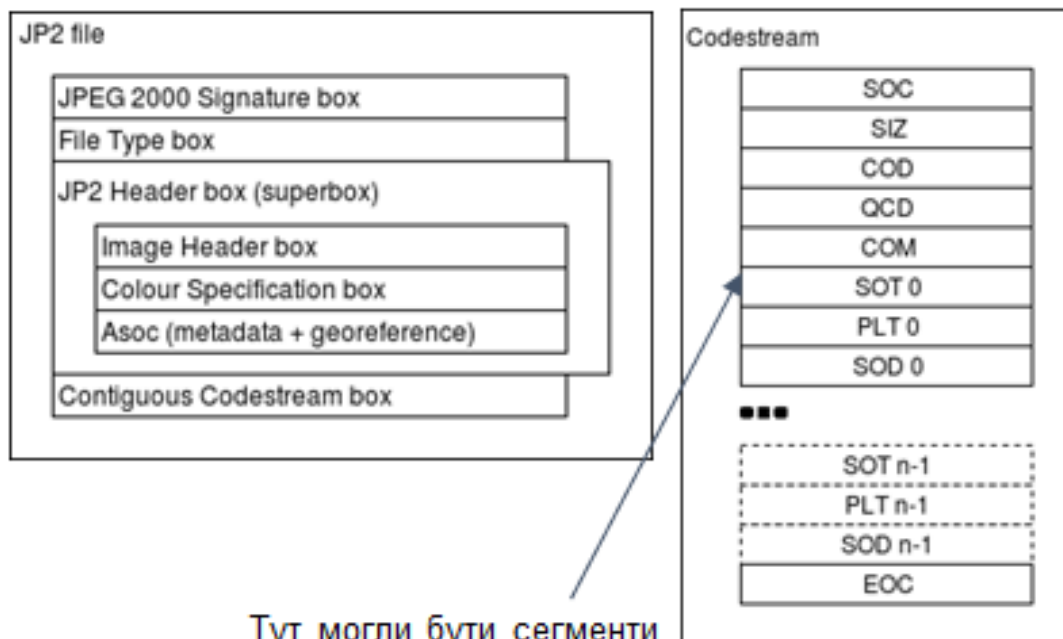


Рисунок 3.2 — Оптимізація використання JPEG2000 на хмарній платформі

Приклад структури файлів Sentinel-2 L1C JPEG2000



Тут могли бути сегменти
TLM із зазначенням
довжини частини тайлу

Рисунок 3.3 — Аналіз структури файлу Sentinel-2 L1C

3.4 Алгоритм обробки супутникових даних в хмарному середовищі та архітектура сервісу

Щоб отримати на виході растровий тайл в EPSG: 3857 в довільній комбінації каналів, готовий для відображення в браузері необхідно виконати наступну послідовність операцій рендерингу.

- Приходить запит на OSM тайл масштабного рівня z , координати - x , y .
- Для тайла $z / x / y$ розраховується BBOX.
- Зі сховища для знімка зчитується інформація про проекції, прив'язці, структурі даних (офсет).
- BBOX перепроєктується в систему координат знімка.
- Далі, знаючи інформацію про внутрішню структуру оптимізованого для роботи в хмарі зображення, розраховуються діапазони тайлів, які необхідно завантажити, щоб покрити BBOX. Дані розпаковуються, отримані для кожного тайла зображення з'єднуються.

Оскільки на виході користувач очікує зображення в проекції Веб Меркатор (EPSG: 3857), зображення перепроєктується. Здійснюється обрізка по BBOX тайла $z / x / y * N$ разів, де N - кількість каналів, які беруть участь при формуванні необхідної комбінації каналів.

Наприклад, $N = 3$ для "R, G, B", $N = 2$ для "(R-N) / (R + N)".

- Отримані сирі дані інтерполюються до розміру тайла (256 * 256 пікселів).
- Формується вихідний масив. На цьому етапі відбувається обробка зображення: канали зливаються в RGB композит або відбувається розрахунок математики між каналами (band math) з попередньої радіометричної корекцією, за методами, розробленими в розділі 2.
- Підготовка масиву до відображення, яка включає розтягнення діапазону яскравості, паншарпенінг [118-120] розтягнення яскравості, підвищення інформативності знімка, застосування палітри.
- Збереження масиву в файл у форматі, що підтримується в браузері (JPEG, PNG).

Послідовність операцій (workflow) рендерингу тайлу наведено на Рис. 3.4. Послідовність операцій в блоці виконується N разів, де N - кількість каналів, що використовуються в даній комбінації.

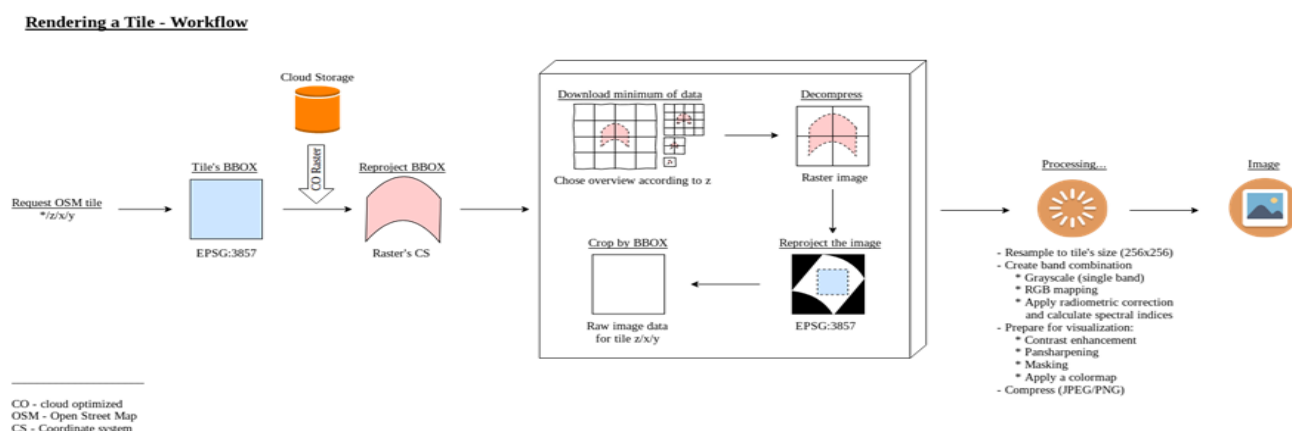


Рисунок 3.4 — Блок-схема процесу рендерингу тайлу

Для прикладу, розглянемо наступне завдання API: для проміжку часу "date_start" - "date_end" знайти всі сцени, зняті сенсорами "sensors", які входять до обраного користувачем полігону (зони інтересу) . Для кожної сцени необхідно розрахувати спектральний індекс "bm_type", а також розрахувати статистику (мінімум, максимум, середнє, медіана, відсоток хмарності) по полігону. Для кожної сцени необхідно повернути ідентифікатор сцени, дату зйомки, статистику.

Послідовність обробки даних, яка виконується для однієї сцени представлена на Рис. 3.5.

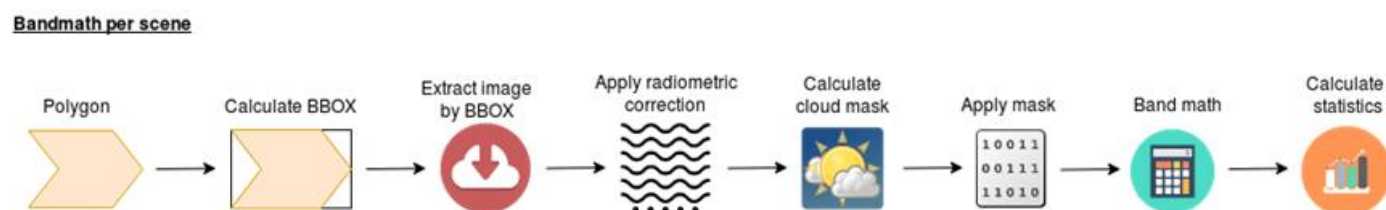


Рисунок 3.5 — Послідовність обробки даних з зони інтересу

На Рис. 3.6 показаний приклад візуалізації результатів, отриманих від API. За рахунок розподілених обчислень (розрахунки для сцен відбуваються на різних інстансах) вдається досягти високої швидкості роботи.

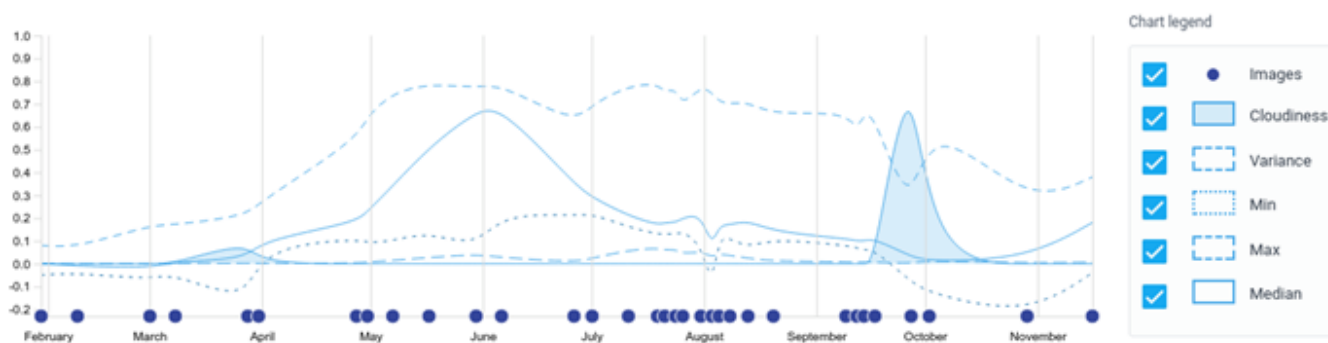


Рисунок 3.6 — Приклад результату обчислення статистики від АОІ:
Sentinel-2, NDVI, 01.01.2017-31.12.2017

Архітектуру розробленого сервісу он-лайн обробки супутникових даних пропонується будувати на основі сумісності з OpenStack платформами. Це забезпечить високу масштабованість обчислювальних ресурсів (тип обчислювального ресурсу, кількість обчислювальних ресурсів) тощо. Схема реалізації сервісу он-лайн обробки супутникових даних в гетерогенному хмарному середовищі (Amazon та Google) представлена на Рис. 3.7.

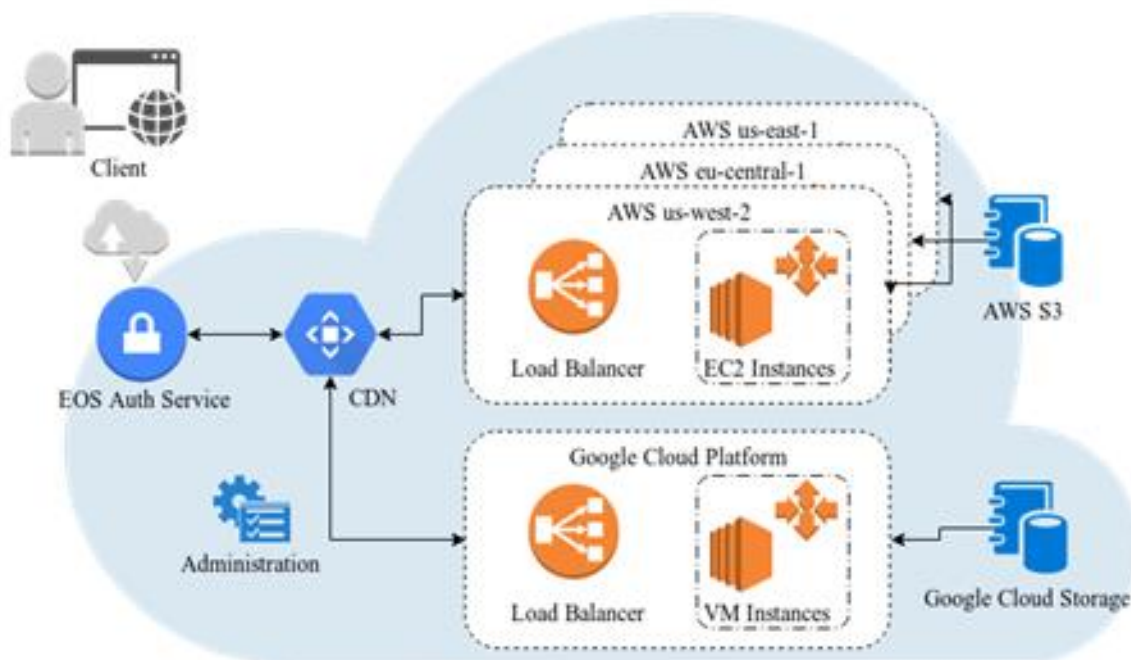


Рисунок 3.7 — Онлайн сервіс обробки даних в реальному часі

На даний час сервіс забезпечує обробку даних з наступних джерел:

Дані на AWS:

- Sentinel-1, 2 L1C (2015- теп. час);
- Landsat 8 (2013- теп. час);
- MODIS MCD43A4 (2013- теп. час);
- NAIP (2012- теп. час);
- CBERS-4MUX (2014- теп. час);
- Terrain Tiles;

Дані на Google Cloud Storage:

- Landsat 4 (1982-1993);
- Landsat 5 (1984-2013);
- Landsat 7 (1999- теп. час).

На даний час сервіс підтримує всі стандартні проекції. Перелік типів даних, що підтримуються: uint8, int16, uint16, float32. Також система підтримує роботу з наступними типами стиснення даних: дефляція, lzw, jpeg. Система розгорнута в кількох місцях по всьому світу для досягнення максимальної швидкості передачі даних та відмовостійкості (Рис. 3.8).



Рисунок 3.8 — Географічне розташування розробленої системи

Досвід автора щодо використання хмарної платформи Amazon для вирішення задач класифікації земного покриву для території Англії, України та Азербайджану за радарними даними представлено у статті [14].

На Рис. 3.9 наведено схематичне порівняння етапів обробки даних на основі хмарного та класичного підходів. Як видно із рисунка, використання хмарної технології дозволяє повністю уникнути одного із етапів - завантаження даних. Цей етап є наріжним каменем при розв'язанні задач супутникового моніторингу для великих територій, оскільки вимагає завантаження через канали мережі Інтернет терабайт даних. Більше того, всі подальші етапи обробки даних в хмарному середовищі можна масштабувати (розпаралелити) на будь-яку кількість обчислювальних серверів.

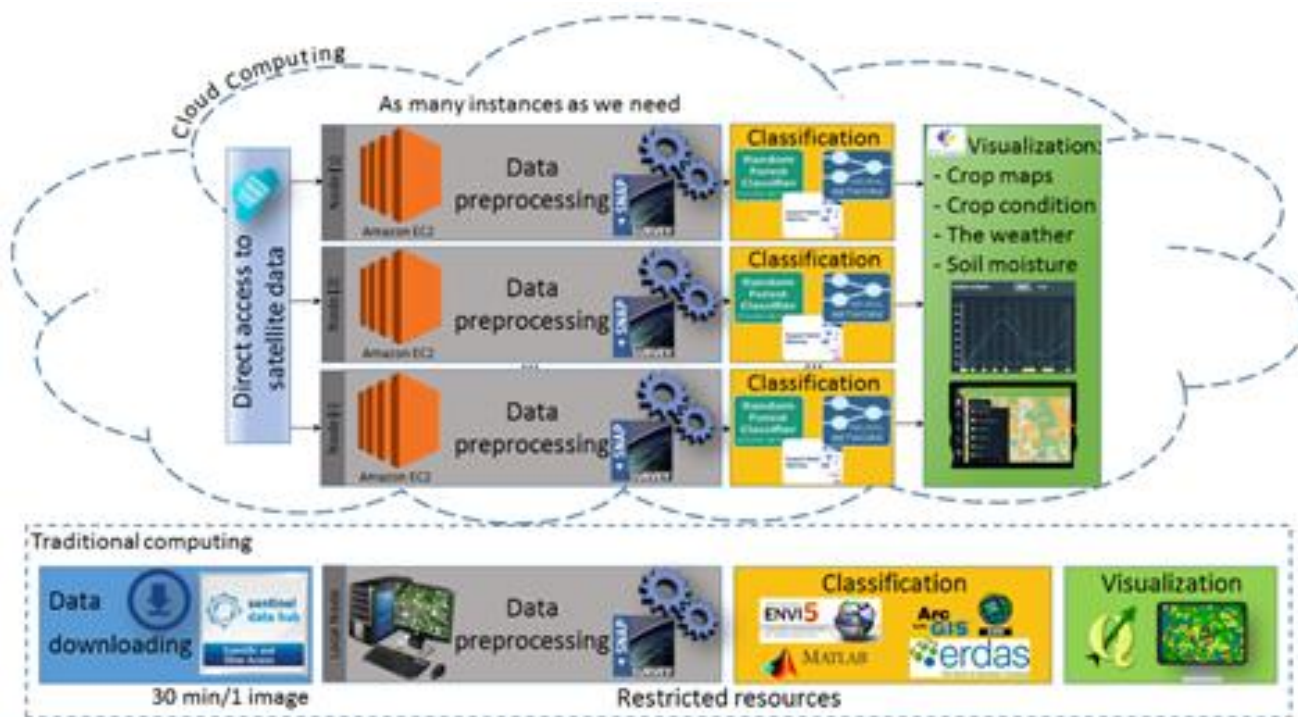


Рисунок 3.9 — Схематичне порівняння хмарного та класичного підходу до обробки супутникових даних

3.5 Хмарний сервіс супутникового моніторингу в реальному часі LandViewer – функціональність і застосування

Наукові результати дисертації практично реалізовані в хмарній програмній платформі Amazon у вигляді cloud-технології оперативного доступу та аналізу супутникових даних, як оптичних, так і радарних. Відмінною рисою технології є надання користувачеві можливості практично миттєвої побудови композитних

кольорових і кольорових синтезованих зображень за даними мультиспектральної зйомки, а також доступ до карт найбільш затребуваних індексів та продуктів.

Геосервіс LandViewer містить архівні зображення зі супутників Landsat-4 (TM і MSS), Landsat-5 (TM і MSS), Landsat-7, Landsat-8, Sentinel-1 і Sentinel-2 (безкоштовний щоденний показ 10-ти знімків). Комбінація каналів "Natural color" (природні кольори) вьюера дозволяє побачити об'єкти земної поверхні так, як вони сприймаються людським оком, а також дає можливість аналізувати стан водних об'єктів і оцінювати глибину. Схожа комбінація каналів є і у двох інших вьюерів, а саме геопортала SENTINEL Hub-Playground і EO Browser, але зображення там значно гірші за якістю обробки.

Land Viewer — це сервіс обробки і аналізу зображень в режимі реального часу, який забезпечує:

- швидкий доступ до петабайт (1000 Тбайт) нових і архівних даних;
- широкий спектр можливостей для пошуку геопросторових зображень в будь-якому масштабі. Це можна зробити за 2 кліка, вибравши необхідну територію на карті або за назвою місця розташування;
- аналіз даних в режимі реального часу з можливістю завантаження зображення будь-якої необхідної локації.
- сервіс Land Viewer надає безліч можливостей для користувачів: від попереднього перегляду до візуалізації будь-яких типів об'єктів на зображенні. Наприклад, щоб детально розглянути пожежі, найкраще використовувати інфрачервоний спектр.

Користувачі можуть переглядати об'єкти, використовуючи різні колірні рішення, щоб дізнатися інформацію про пожежі, повені, незаконні лісозаготівлі або водні ресурси. Також можливо порівняти геопросторові зображення для відстеження динаміки змін у розвитку каналів, лісів та інших природних об'єктів.

З використанням LandViewer користувачі мають можливість аналізувати супутникові зображення Sentinel-2 та Landsat-8, що зберігаються на платформі Amazon Cloud, застосовувати фільтри пошуку за датою отримання зображень, хмарності або висоти сонця, аналізувати і завантажувати зображення.

Використовуючи мозаїчну технологію, LandViewer дозволяє відновити зображення з архівних даних з будь-яким зумом менш ніж за 10 секунд. Зображення можна переглядати в різних комбінаціях смуги або спектрального індексу, такі як NDVI, обраного для надання інформації, яка найкращим чином відповідає потребам користувача. Ці можливості забезпечуються розробленою в дисертації технологією, яка перетворює на льоту дані необроблених супутникових знімків, що зберігаються в 16-бітному форматі GeoTIFF, які користувач може відразу подивитися на екрані в Web-браузері. Немає необхідності створювати і зберігати додаткові екрани попереднього перегляду або архівувати дані, оскільки зображення можуть відображатися безпосередньо в браузері.

Користувач може застосовувати різні комбінації з попередньо встановленої або налаштованої спектральної смуги, щоб виділити на зображенні і візуалізувати дані будь-якого типу. Наприклад, лісові пожежі легше побачити в інфрачервоному спектрі. Різні групи представлень доступні для аналізу рослинності, сільськогосподарських угідь, крижаного покриву, водних поверхонь. Користувачі можуть детально розглянути всі об'єкти інтересу (пожежами, повеннями, незаконної вирубки лісів або управління водними ресурсами), розташовані в межах сцени. Крім того, можна порівняти в хронологічному порядку геопросторові зображення за різні роки, щоб відстежувати зміни в розвитку русел, лісів та інших природних об'єктів.

На Рис. 3.10–3.12 показані приклади використання Web-сервісу LandViewer для автоматизованого виявлення змін міської інфраструктури за супутниковими знімками. На Рис. 3.13–3.14 показані приклади використання Web-сервісу LandViewer для автоматизованого виявлення змін на території розробки нафтових родовищ.

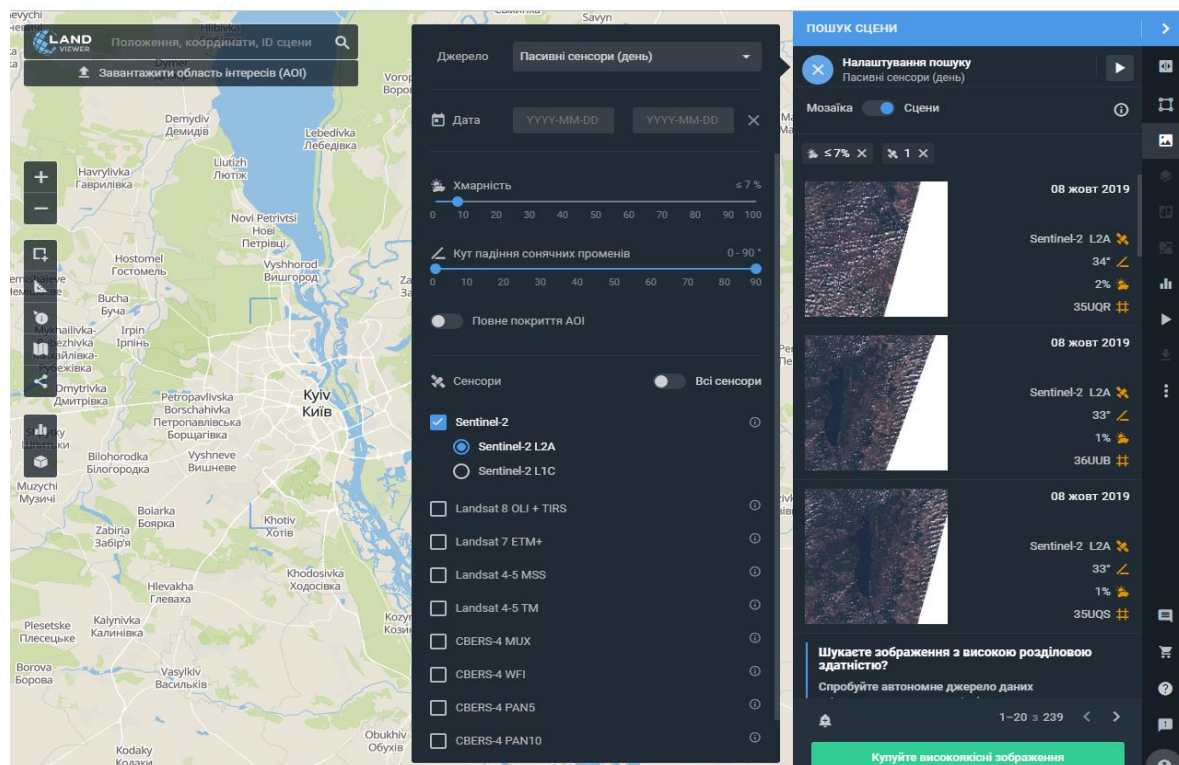


Рисунок 3.10 — Загальний вигляд інформаційної системи
хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних



Рисунок 3.11— Зміна міської інфраструктури з 2012 по 2014 р.

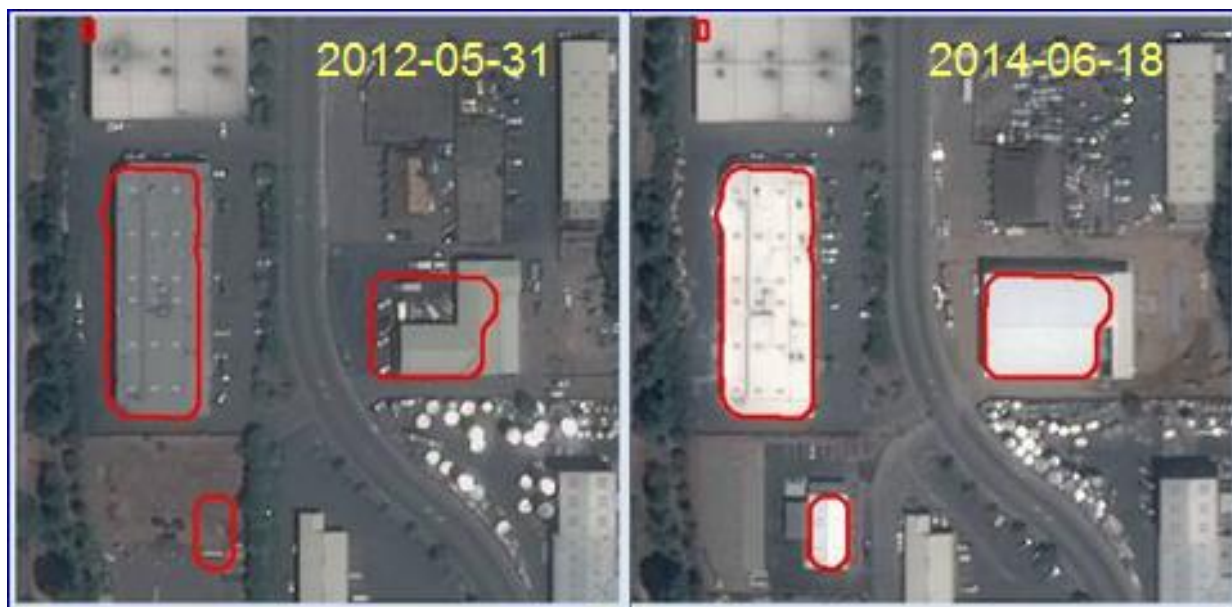


Рисунок 3.12 — Приклади виявлених змін в міській забудові

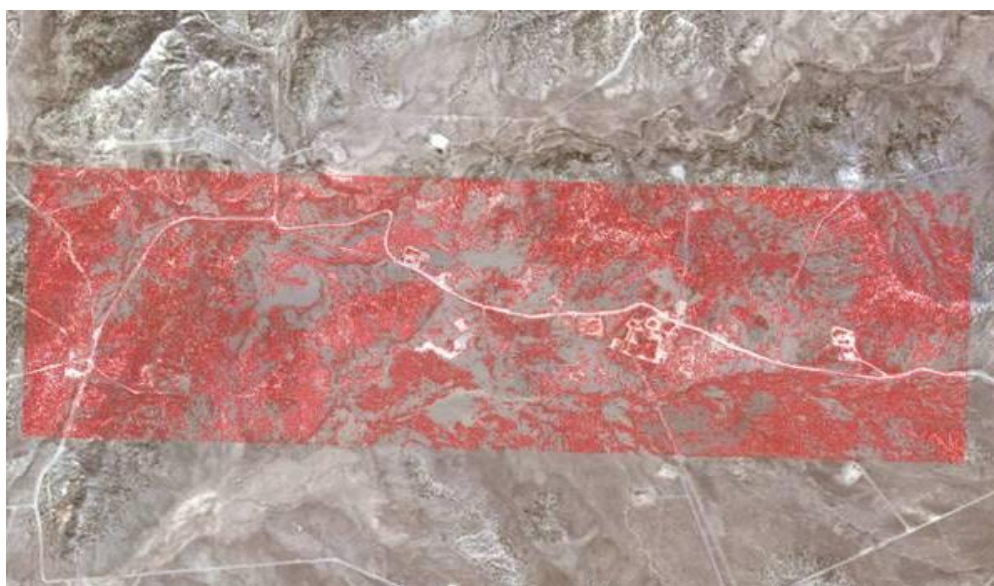


Рисунок 3.13 — Зміни на обраній території розробки нафтових родовищ за супутниковими знімками (без урахування рослинності)

На Рис. 3.15–3.16 показані приклади використання Web-сервісу LandViewer для автоматизованого визначення площ газонів і дерев на території приватних домоволодінь. На Рис. 3.15 приведено графічне представлення розрахунку значення вегетаційного індексу NDVI за три роки.



Рисунок 3.14 — Зміни на обраній території розробки нафтових родовищ за супутниковими знімками (з урахуванням рослинності)



Рисунок 3.15 — Зображення вегетаційного індексу NDVI в середовищі Web-сервісу LandViewer

Геоінформаційні Web-сервіси LandViewer мають наступні переваги:

- орієнтація на масового користувача (сервіси можуть бути використані для вирішення більшості практичних завдань, як індивідуальних, так і корпоративних);
- можливість швидкого освоєння для нефахівців в області обробки супутникових знімків (фермери, лісники, маркетологи, туристи, рекламні агенти, картографи, рятувальники, екологи, будівельники, нафтовики, менеджери різного рівня ін.);



Рисунок 3.16 — Виділення об’єктів і накладання результатів обробки на вихідний знімок

- робота безпосередньо в браузері без додаткового програмного забезпечення;
- програмна і апаратна незалежність, що дозволяє використовувати LandViewer на мобільних пристроях;
- висока гнучкість середовища обробки, що дозволяє користувачу налаштовувати програмне забезпечення під конкретні завдання (як на етапі

автоматичної обробки за допомогою готових ланцюжків, так і на етапі інтерактивного створення ланцюжків обробки);

- можливість формування протоколу обробки знімка при вирішенні тестового завдання (тобто налаштування сервісу на вирішення конкретного завдання), и його використання обробки наступних знімків в автоматизованому режимі;

- можливість збереження всієї послідовності операцій обробки і налаштування параметрів кожної операції зберігаються на сервері LandViewer і можуть бути застосовані для інших зображень;

- результати обробки знімків зберігаються на сервері LandViewer що дозволяє клієнтам користуватися Web-сервісами LandViewer незалежно від їх місця знаходження.

Основними клієнтами Web-сервісів LandViewer є наступні:

- окремі користувачі (фермери, туристи, рибалки, дачники, автолюбители, спортсмени та ін.);

- співробітники компаній (лісники, маркетологи, рекламні агенти, рятувальники, екологи, будівельники, нафтовики, менеджери різного рівня ін.);

- фахівці в області обробки супутникових знімків та ГІС (картографи, розробники, проектувальники, програмісти і ін.)

- програмні інтерфейси інших хмарних систем, які забезпечують комплексну спеціалізовану обробку даних [10, 12, 14].

Приклад типової архітектури хмарної системи аналізу супутникових даних, яка є клієнтом LandViewer, наведено на Рис. 3.17. Ця система, архітектура якої розроблена автором дисертації, використовується для розв'язання задач класифікації і моніторингу посівів в різних країнах світу [121]. Для подолання проблеми великих даних автоматичне завантаження та попередня обробка супутникових даних Sentinel-1 здійснюється в хмарній платформі Amazon за допомогою технологій, описаних в пп. 3.3–3.4 (Рис. 3.18). Запропонована система забезпечує автоматичний пошук даних на порталі ESA Sentinel hub по заданій користувачем території, фільтрування за визначеними критеріями, наприклад, період зйомки супутника та потокове розпаралелене завантаження даних. Для

попередньої обробки супутникових даних Sentinel-1 використовуються методи підвищення якості зображень, описані в пп. 2.2–2.3. Для попередньої обробки радарних даних на першому етапі проводиться фільтрація даних Sentinel-1, на наступному кроці здійснюється калібрування даних та геометрична корекція, використовуючи Range-Doppler процедуру з використанням цифрової моделі рельєфу SRTM 3Sec Digital Elevation Model (DEM). Останнім етапом здійснюється переведення коефіцієнту зворотного розсіювання в децибели. Після закінчення процедури попередньої обробки даних, VV та VH канали склеюються між собою в один знімок. Потім всі зображення, що відзняті за один день, об'єднуються разом в один багатовимірний масив та завантажуються на ресурс AWS S3 для подальшого зберігання.

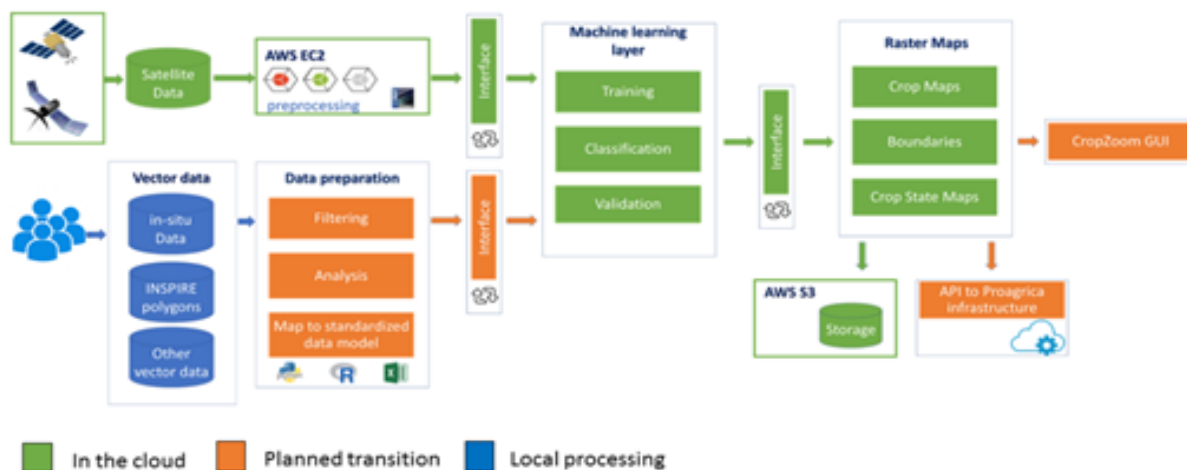


Рисунок 3.17 — Приклад типової архітектури системи для аналізу супутникових даних

Ще одним прикладом хмарної системи, що використовує програмний інтерфейс розробленого в п. 3.5 сервісу і реалізує технологію обробки супутникових даних, розроблену в пп. 3.3–3.4, є система моніторингу якості повітря, описана в [10, 12]. В цій системі сенсори, що оцінюють якість повітря, передають накопичені вимірювання до блока контролю та прийняття рішень, який передає інформацію до хмарного сховища Amazon, де безпосередньо виконується обробка та аналіз спільно з супутниковими даними (Рис. 3.19). Основою для системи прийняття рішень є Sugeno-Takagi контролер з 12 входами для отримання інформації щодо поточного

стану якості повітря як всередині приміщення, так і назовні для ряду забруднювачів (NO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , CO).

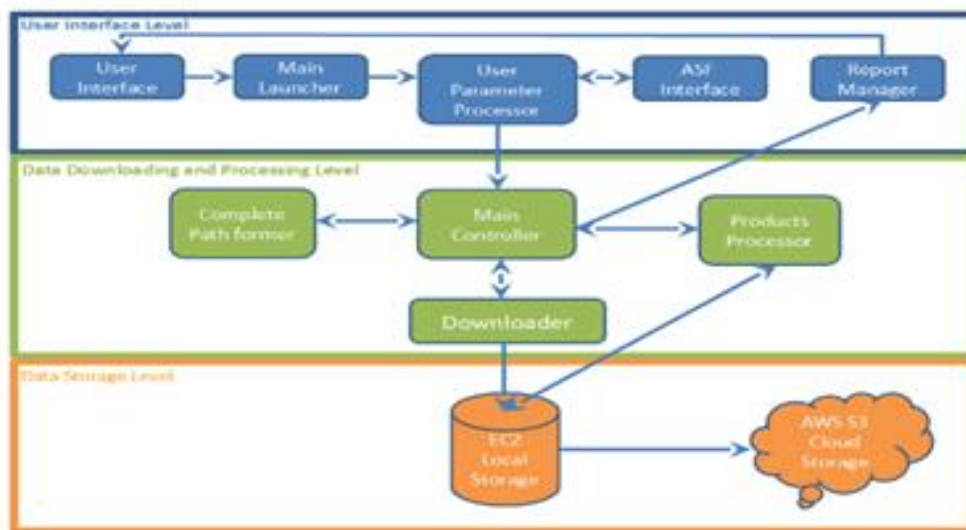


Рисунок 3.18 — Система для автоматичного завантаження та попередньої обробки супутникових даних Sentinel-1

Система прийняття рішень використовує методи інтелектуального аналізу даних, зокрема методи глибинного навчання, методи на основі нейронних мереж та аналізу ризиків (Рис. 3.20). Як показує досвід, ці технології успішно застосовуються для моніторингу стану довкілля з використанням супутникових даних.

Система має широке коло застосувань для моніторингу та покращення мікроклімату будь-якого робочого чи житлового приміщення, для забезпечення інформування користувачів щодо вмісту у повітрі небезпечних забруднюючих речовин у приміщенні та на вулиці, для надання рекомендації щодо можливостей покращення ситуації.

Для забезпечення ефективної розподіленої обробки даних використовуються хмарні обчислювальні ресурси Amazon та технології обробки супутникових даних, описані в пп. 3.3-3.4. Таке рішення є ефективним, оскільки даний провайдер хмарних обчислювальних ресурсів зберігає на свої сховищах і репліки супутникових даних, що дає можливість без значних витрат часу проводити злиття даних сенсорів

та відповідних супутникових продуктів, оцінювати Air Quality Index (AQI) на гармонізованих часових рядах спостережень.

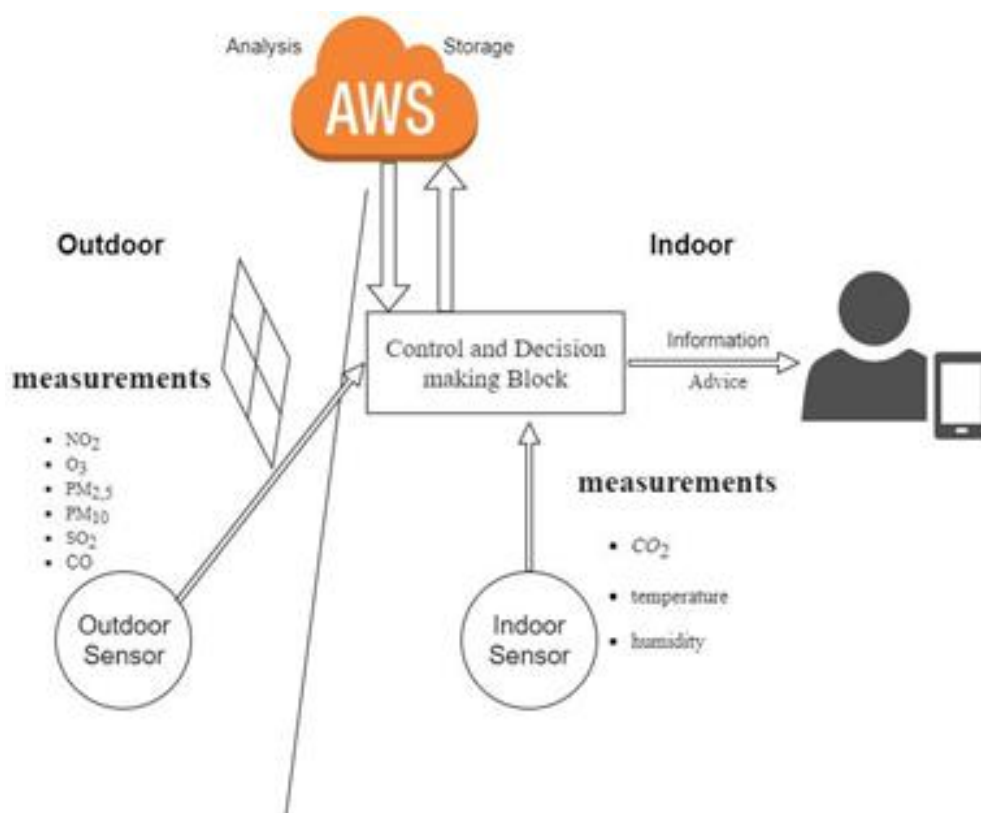


Рисунок 3.19 — Високорівнева архітектура системи моніторингу якості повітря з користувацьким інтерфейсом

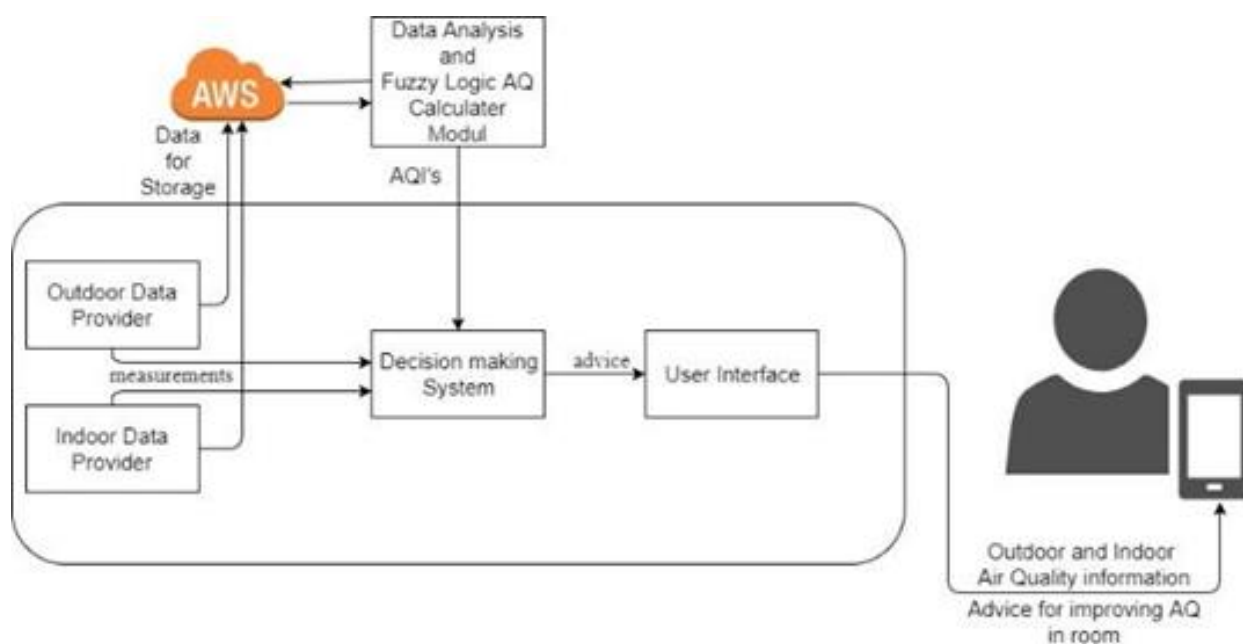


Рисунок 3.20 — Принципова схема блоку прийняття рішень

3.6 Висновки до третього розділу

1. Розроблено інформаційну систему хмарної обробки часових рядів багатовимірних геопросторових даних високого і надвисокого розрізнення. Запропоновано архітектурні і технічні рішення швидкого доступу та тематичної обробки супутникових даних, що зберігаються у хмарному середовищі. Для підвищення швидкості роботи хмарних сервісів запропоновано оптимізований формат зберігання даних, який передбачає збереження кожного спектрального каналу в окремому файлі, використання стиснення файлів, що швидко розпаковується, включення підсумкової статистики та чіткі правила іменування файлів. Архітектуру он-лайн сервісу обробки супутникових даних запропоновано будувати на основі сумісності з OpenStack платформами. Це забезпечує високу масштабованість обчислювальних ресурсів.
2. Вперше розроблено інформаційну технологію зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі. Запропонована технологія забезпечує виконання задач супутникового моніторингу в реальному часі та їх масштабування на великі території без збільшення часу розв'язання задач.
3. Розроблені методи та інформаційні технології реалізовані у вигляді геопросторового Web-сервісу LandViewer, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс). У порівнянні з Грід-обчисленнями, модель хмарного обчислення PaaS надає розробнику прикладного програмного забезпечення та кінцевому користувачеві більш гнучку платформу для роботи з віддаленими обчислювальними ресурсами, що значно зменшує економічні витрати. Web-сервіс розгорнутий в різних геолокаціях для забезпечення максимальної швидкості передачі даних та відмовостійкості та покладений в основу систем супутникового моніторингу посівів і якості повітря.

Результати даного розділу опубліковано в роботах автора [7, 10, 13, 16, 21, 23-25, 30].

РОЗДІЛ 4 РОЗВ'ЯЗАННЯ ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ НА ОСНОВІ ЗАПРОПОНОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ХМАРНОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ

4.1 Моніторинг антропогенного впливу в результаті видобутку бурштину

Україна займає одне з провідних місць у світі за запасами бурштину, при цьому частка каменів ювелірної якості складає 25%, тоді як в Польщі і РФ — 10-15%. Бурштин в Україні залягає на невеликій глибині і має дуже високу якість. Це робить країну одним з лідерів за запасами цього ресурсу. Найцінніші породи бурштину добувають в Рівненській області (Рис. 4.1), де знаходиться одне з найбільш великих в Україні родовищ бурштину для виготовлення ювелірних виробів.

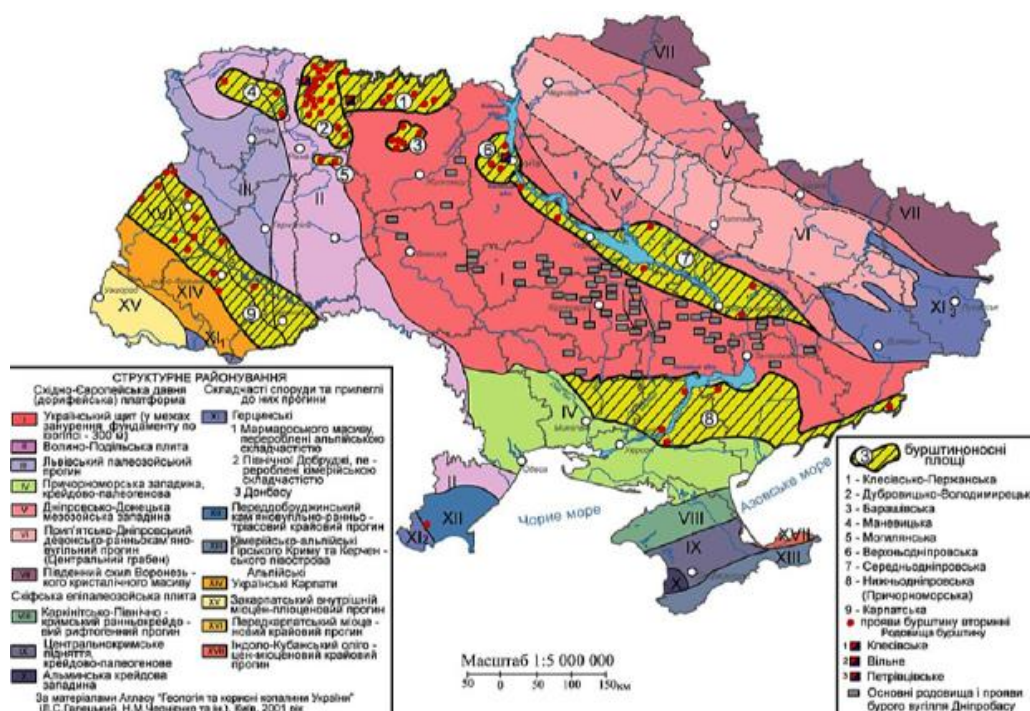


Рисунок 4.1 — Основні родовища бурштину в Україні

У трьох областях України — Волинській, Житомирській та Рівненській (Рис. 4.2) — розвивається незаконний видобуток бурштину, через який наноситься непоправна шкода природних ресурсам країни. Наприклад, в Рокитнівському, Дубровицькому та Заріччянському районах Волинської області виявлено 11 місць

незаконного видобутку бурштину-сирцю. У м. Олевськ Житомирської області внаслідок незаконного видобутку мінералів були знищені тисячі гектарів землі і лісів. Ця територія на довгі роки стала непридатною ні для зростання лісів, ні для ведення сільського господарства. З'явилися величезні площі, де знищений ліс та відбулася зміна структури ґрунтового покриву, де неадекватно використовуються водні ресурси. Відпрацьовані місця видобутку бурштину перетворюються практично в пустелю, непридатну для подальшого використання.

Основні завдання супутникового моніторингу наслідків незаконного видобутку бурштину є наступними:

- виявлення територій і визначення площ, де ведеться незаконний видобуток бурштину;
- виявлення порушень діючих правил промислового і легального видобутку бурштину;
- контроль діяльності на територіях, що постраждали від незаконного видобутку бурштину;
- аналіз наслідків незаконного видобутку бурштину, а саме, моніторинг динаміки та характеру змін ґрунту, рослинності і водойм.

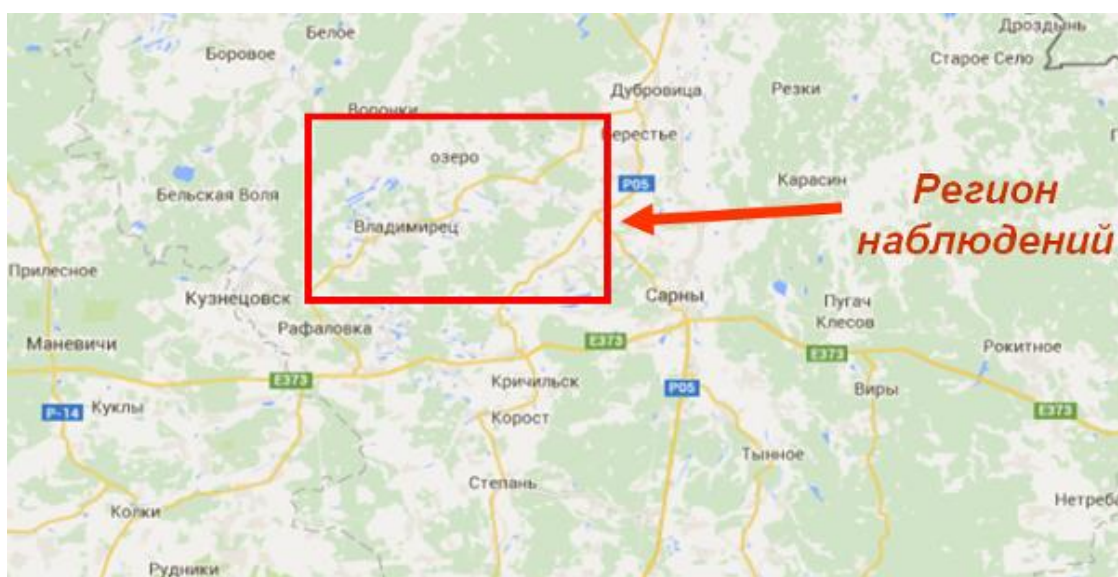


Рисунок 4.2 — Території супутникового моніторингу наслідків незаконного видобутку бурштину (Рівненська область, Володимирецький район)

До супутникових знімків для моніторингу наслідків незаконного видобутку бурштину, висуваються наступні основні вимоги:

- зображення що обробляються, повинні бути для одної і тієї ж території;
- зображення повинні бути отримані в один і той же сезон;
- зйомка повинна бути проведена однотипними знімальними системами (порівняння знімків можливо тільки за умови відповідності використовуваних спектральних діапазонів);
- зображення повинні бути однакового або близького просторового розрізнення, інакше зображення будуть містити різну інформацію про об'єкти.

Для супутникового оглядового моніторингу наслідків незаконного видобутку бурштину можна використовувати зображення середнього просторового розрізнення з супутників Landsat-7 (знімальний прилад ETM) і Landsat-8 (знімальний прилад OLI).

Зображення Landsat можна виразити у матричній формі наступним чином [122]:

$$X_{n,b} = \begin{pmatrix} x_{1,1} & \square & x_{1,n} \\ \square & \square & \square \\ x_{6,1} & \square & x_{6,n} \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

де n — кількість пікселів і b — кількість діапазонів. Розглядаючи кожен смугу як вектор, вищевказану матрицю можна спростити наступним чином:

$$X_k = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \square \\ x_6 \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

де k — кількість смуг. Для зменшення розмірності вихідних смуг необхідно обчислити власні значення матриці коваріації. Цю матрицю можна обчислити наступним чином [122]:

$$C_{b,b} = \begin{pmatrix} \sigma_{1,1} & \square & \sigma_{1,6} \\ \square & \square & \square \\ \sigma_{6,1} & \square & \sigma_{6,6} \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

де $\sigma_{i,j}$ — коваріація кожної пари різних смуг.

$$\sigma_{i,j} = \frac{1}{N-1} \sum_{p=1}^N (DN_{p,i} - \mu_i)(DN_{p,j} - \mu_j), \quad (4.4)$$

де $DN_{p,i}$ цифрове число пікселя p у діапазоні i , $DN_{p,j}$ — цифрове число пікселя p у діапазоні j , μ_i та μ_j — середні значення DN для діапазонів i та j відповідно.

З матриці дисперсії-коваріації власне значення (λ) обчислюються як корені характерного рівняння:

$$\det(C - \lambda I) = 0, \quad (4.5)$$

де C — матриця коваріації смуг, а I — матриця діагональної тотожності.

Власні значення вказують на оригінальну інформацію, яку вони зберігають. З цих значень можна отримати відсоток початкової дисперсії кожного головного компонента, обчислюючи відношення кожного власного значення відносно їх суми. Ті компоненти, які містять мінімальну дисперсію і, таким чином, мінімальну інформацію, можна відкинути. Основні компоненти можуть бути виражені в матричній формі наступним чином:

$$Y_6 = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \square \\ y_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_{1,1} & \square & w_{1,6} \\ & \square & \square \\ w_{6,1} & \square & w_{6,6} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \square \\ x_6 \end{pmatrix}, \quad (4.6)$$

де Y — вектор основних компонентів, W — матриця перетворення, а X — вектор вихідних даних.

Коефіцієнти матриці перетворення W — це власні вектори, які діагоналізують матрицю коваріації вихідних смуг. Ці значення надають інформацію про взаємозв'язок діапазонів з кожним головним компонентом. За допомогою цих значень основний компонент можна пов'язати з реальною змінною. Власні вектори можна отримати з рівняння вектор-матриця для кожного власного значення λ_k :

$$(C - \lambda_k I)w_k = 0, \quad (4.7)$$

де λ_k — k власних значень (шість у прикладі, що розглядається), а w_k — k власних векторів [122].

У роботі були використані мультиспектральні зображення заданої ділянки із супутників Landsat-7 за 2002 р. (рис. 4.3) і Landsat-8 за 2015 р. (рис. 4.4).



Рисунок 4.3 — Знімок заданого району з супутника Landsat-7 від 6 вересня 2002 р.
(канали видимого діапазону)

Для детального аналізу наслідків незаконного видобутку бурштину була використана мозаїка з мультиспектральних знімків високого просторового розрізнення (Рис. 4.5). Для кількісної оцінки наслідків незаконного видобутку бурштину була виконана обробка знімків заданої ділянки спостережень.



Рисунок 4.4 — Знімок заданого району з супутника Landsat-8 від 4 жовтня 2015 р.
(канали видимого діапазону)



Рисунок 4.5 — Фрагмент мозаїки супутникових знімків із високим просторовим розрізненням, побудованої для території незаконного видобутку бурштину

Основні етапи обробки знімків із супутників Landsat:

- підготовчі операції (вибір області інтересу, пошук знімка за датою і контроль якості знімка);
- спектральний синтез в натуральних кольорах з використанням теплових каналів;
- створення різнецевих зображень для панхроматичних каналів двох різночасових знімків заданої території;
- порогова бінаризація різнецевого зображення;
- морфологічна фільтрація бінарного зображення;
- векторизація і розрахунок геометричних характеристик;
- візуалізація змін на мапі.

Основні етапи обробки мультиспектральних знімків високого просторового розрізнення:

- підготовчі операції (вибір області інтересу, пошук знімка за датою і контроль якості зображення);
- формування мозаїки для заданої території;
- створення навчальних вибірок для цільової території;
- контрольована класифікація вихідного зображення;
- морфологічна фільтрація класифікованого зображення;
- векторизація і розрахунок геометричних характеристик;

- візуалізація змін на карті.

На Рис. 4.6 показані результати виявлення змін на заданій території по знімках із супутників Landsat-7 і Landsat-8 (ділянка №1). На Рис. 4.7 показані результати виявлення змін на заданій території по знімках із супутників Landsat-7 і Landsat-8 (ділянка №2). За даними супутників Landsat, тільки на територіях моніторингу площа ділянок, які постраждали від незаконного видобутку бурштину, становить понад 500 га.

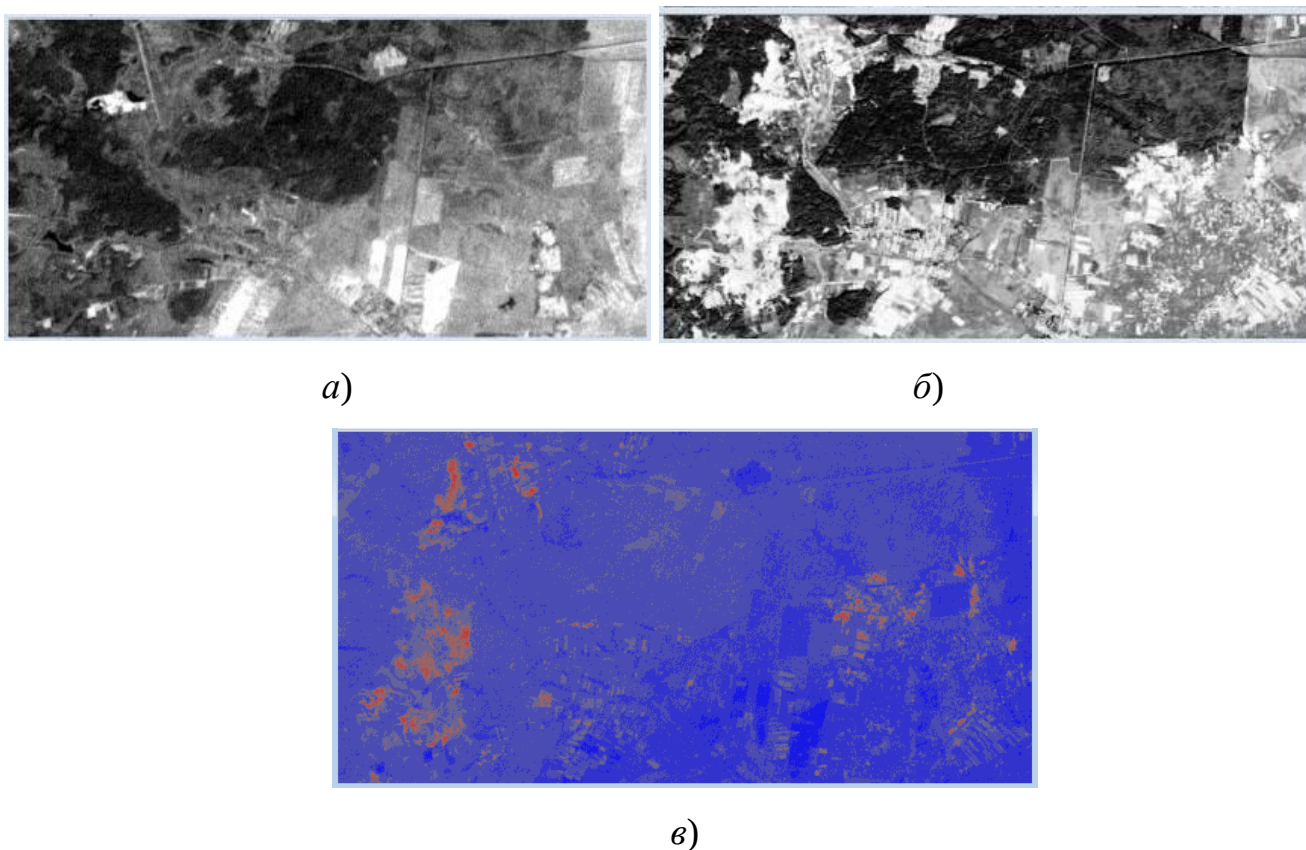


Рисунок 4.6 — Виявлення змін на заданій території по знімках Landsat-7 і Landsat-8 (ділянка №1): *а)* фрагмент знімку заданого району зі супутника Landsat-7 від 06.09.2002 р. (панхроматичний канал); *б)* фрагмент знімку заданого району зі супутника Landsat-8 від 04.10.2015 р. (панхроматичний канал); *в)* виявлення змін (червоним кольором виділені місця незаконної добичі бурштину)

На Рис. 4.8 показані основні етапи обробки зображень при виявленні змін на заданій території по мультиспектральним супутниковим знімкам високого просторового розрізнення (фрагмент ділянки №3).

На Рис. 4.9 показані результати виявлення змін на заданій території по мультиспектральному знімку з високою роздільною здатністю (ділянка №3).

За результатами обробки знімків високого просторового розрізнення, площа території, що постраждала від свіжих розробок незаконного видобутку бурштину становить понад 138 га.

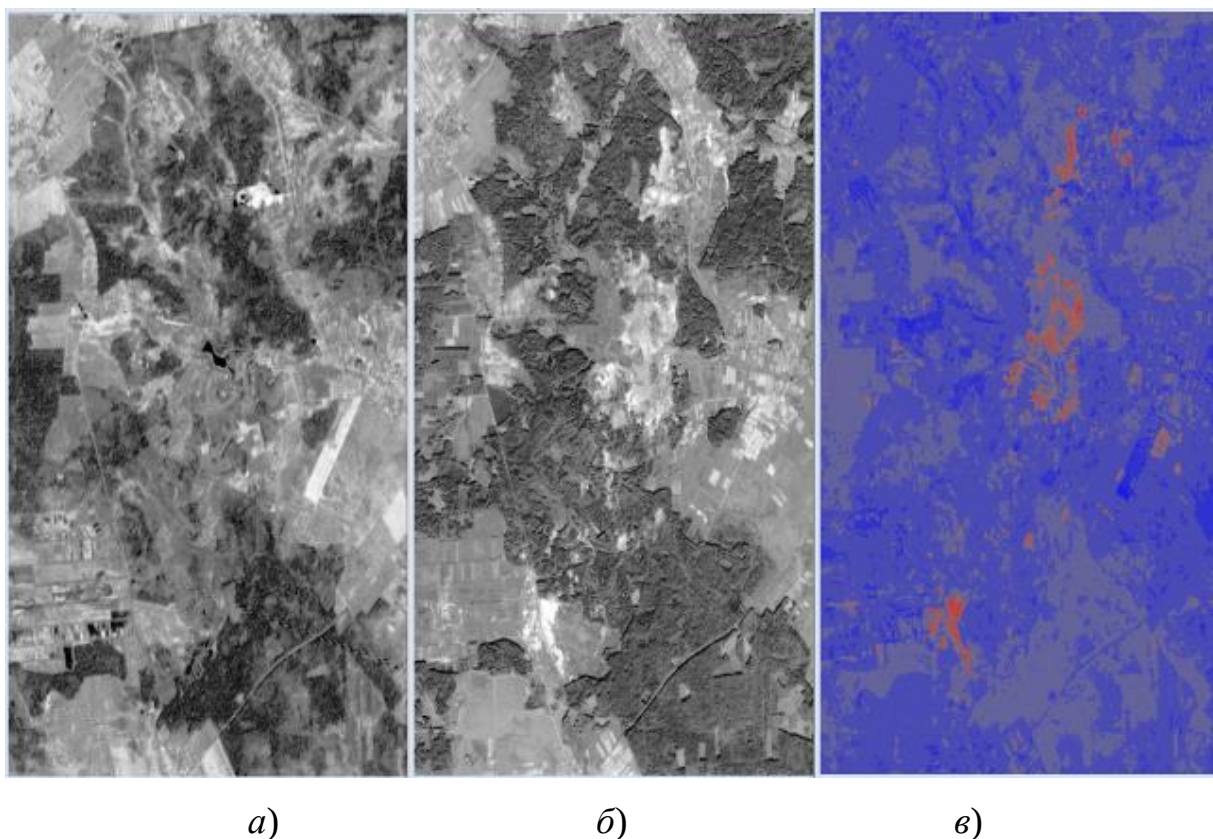


Рисунок 4.7 — Виявлення змін на заданій території по знімках із супутників Landsat-7 і Landsat-8 (ділянка №2): а) фрагмент знімку заданого району зі супутника Landsat-7 від 06.09.2002 р. (панхроматичний канал); б) фрагмент знімку заданого району зі супутника Landsat-8 від 04.10.2015 р. (панхроматичний канал); в) виявлення змін (червоним кольором виділені місця незаконної добичі бурштину)

Також був проведений детальний візуальний аналіз динаміки змін після незаконного видобутку бурштину на заданій території (ділянка №3) з використанням супутникових знімків високого розрізнення (Рис. 4.10).

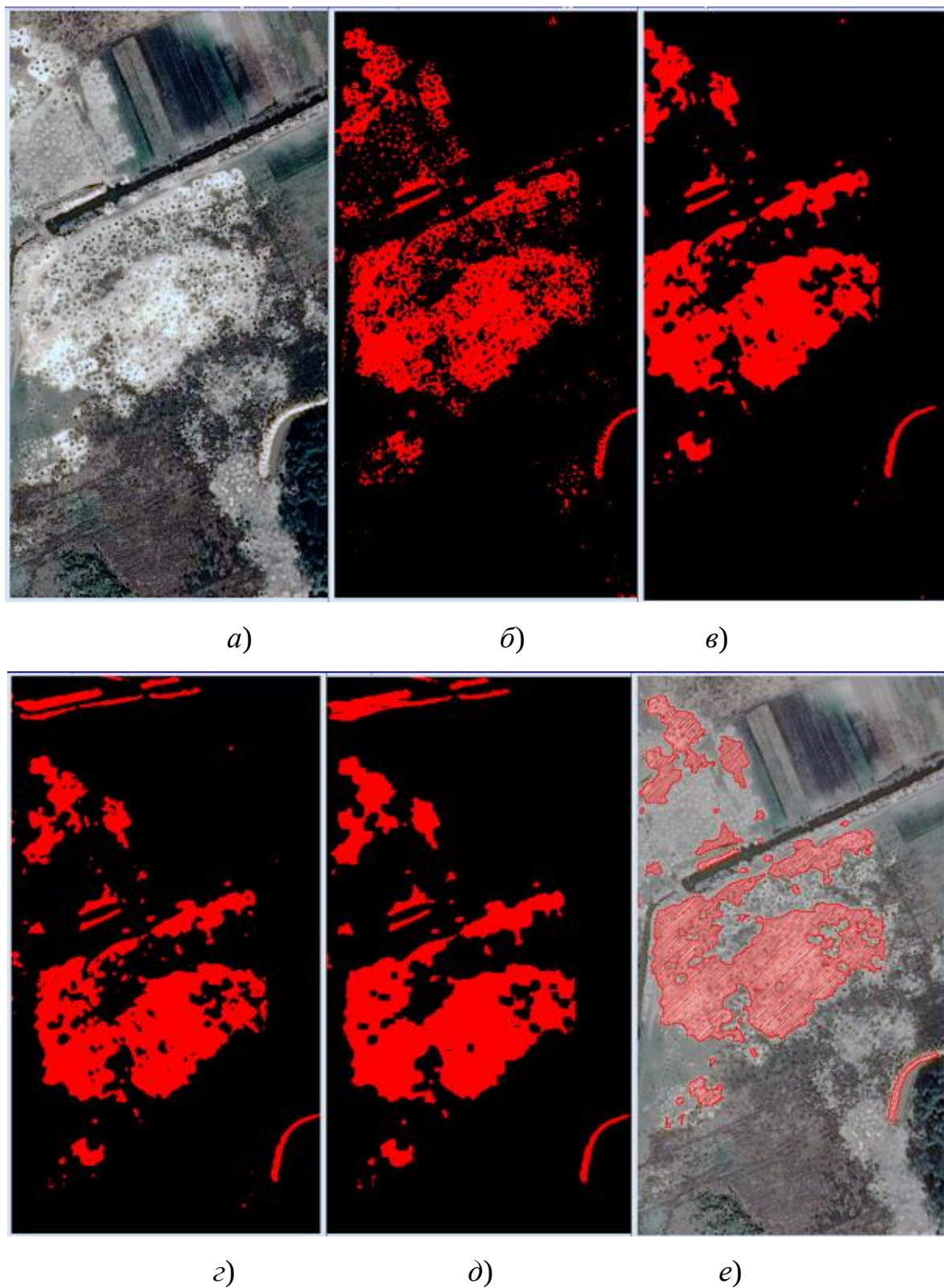


Рисунок 4.8 — Етапи виявлення нових розробок на заданій території по мультиспектрального знімкам з високим розрізненням (фрагмент ділянки №3):
 а) первинний знімок; б) результат класифікації; в) результат фільтрації;
 г) результат просіювання; д) результат морфології; е) векторні та растрові дані

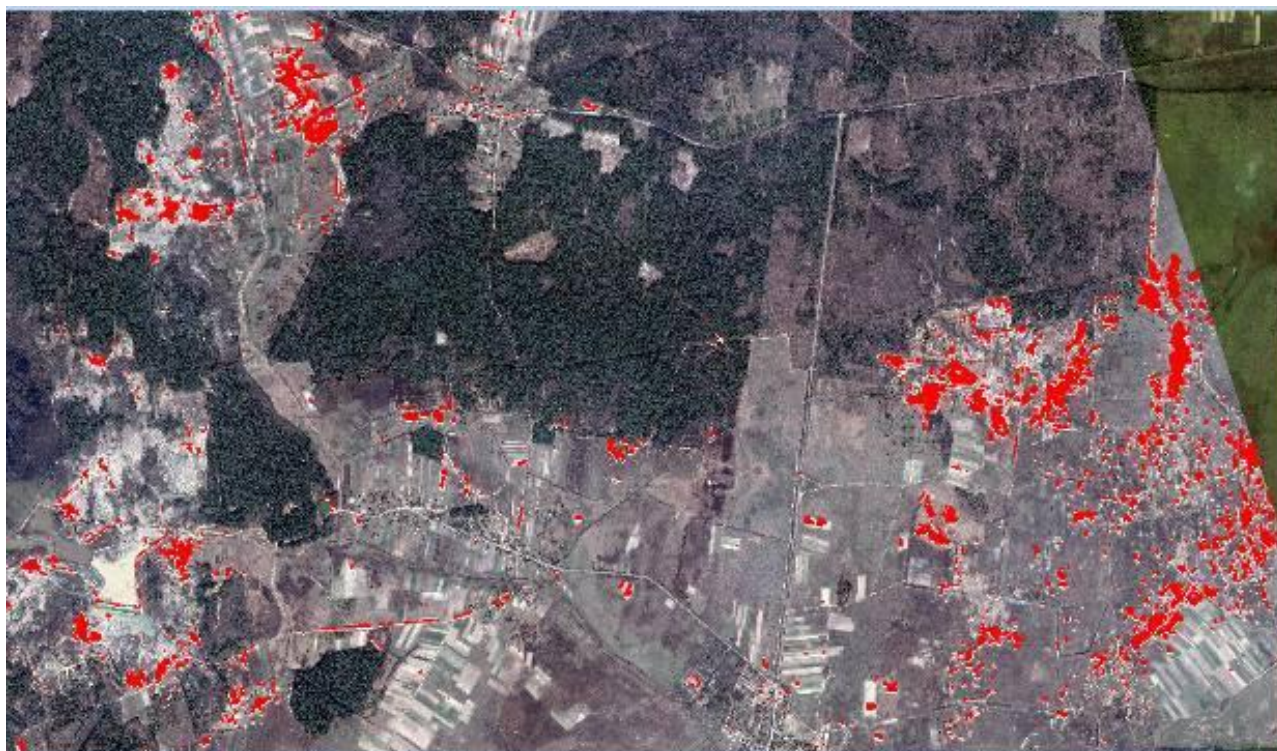


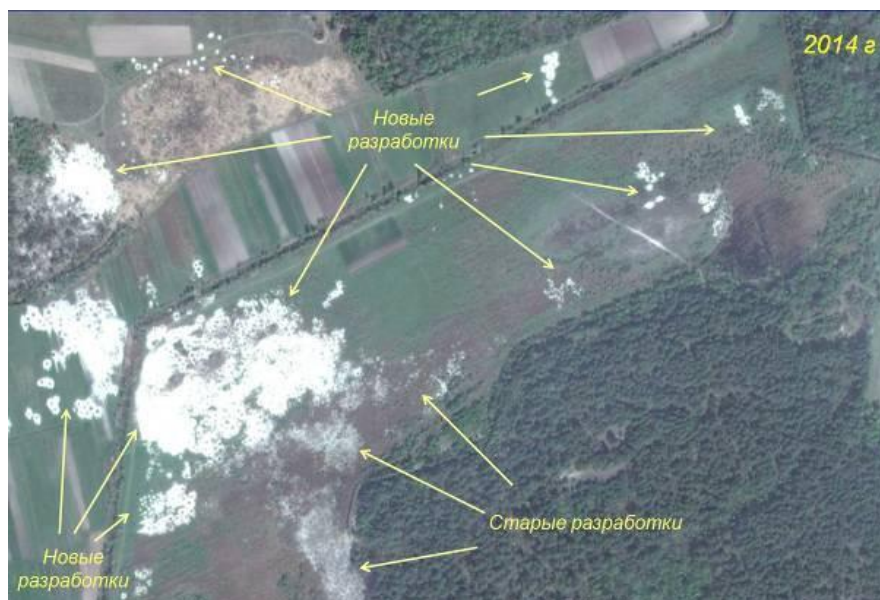
Рисунок 4.9 — Виявлення свіжих розробок на заданій території по мультиспектральним знімкам з високим розрізненням (діл. №3)



а)

б)

Рисунок 4.10 — Динаміка змін в результаті незаконного видобутку бурштину на заданій території (ділянка №3): а) знімок з фіксацією у 2010 р.; б) знімок з фіксацією у 2011 р.



а)



б)

Рисунок 4.11 — Динаміка змін в результаті незаконного видобутку бурштину на заданій території (ділянка №3):

а) знімок з фіксацією у 2014 р.; б) знімок з фіксацією у 2015 р.

4.2 Моніторинг вирубки лісів

З виведенням на орбіту супутника Sentinel-1A стали можливими обробка і аналіз даних радарної зйомки. Для процесу моніторингу природних і техногенних ландшафтів добре підходять продукти рівня обробки 1 — SLC (Single Look

Complex) і GRD (Ground Range Detected). Кожний з продуктів Sentinel-1 зазначених типів спрямований на вирішення певних завдань. Так, наприклад, GRD найбільш ефективний для моніторингу сільськогосподарських територій. Він містить дані амплітуди радарного сигналу С-діапазону (довжина хвилі радара — 5,54 см). Продукти SLC включають, крім амплітудної, ще й фазову складову радарного сигналу. Однією з вирішених в дослідженні задач є комплексне використання оптичних і радарних даних ДЗЗ для моніторингу природних ландшафтів та порівняльна оцінка результатів обробки двох різних видів зйомок.

Одною з тестових ділянок, що розглядалися в дослідженні, була територія з площею 732 км² біля м. Дніпро. Обрана територія характеризується наявністю різних класів земного покриття: хвойних лісів, пісок, вода, змішаний ліс, сільськогосподарські поля, територія населених пунктів. В дослідженні було використано дані мультиспектрального сканера Landsat-8 OLI [74, 123], отримані 07.08.2015 р. і дані продукту GRDH (GRD High Resolution) [124], відзняті радарною апаратурою супутника Sentinel-1A 06.08.2015 р. Таким чином, виходячи з дат зйомок можна стверджувати, що дані отримані практично одночасно, з незначним часовим зсувом і є практично ідеальними для порівняння.

Коефіцієнт зворотного розсіювання σ_0 може бути використаний для визначення стану вегетації, вологості ґрунтів і служити деяким аналогом нормалізованого різницевого вегетаційного індексу NDVI. У дослідженні була обрана поляризація VV радарної сцени продукту GRDH.

Радарні дані оброблялися за наступною схемою.

1. Отримання орбітально-скоригованих даних всієї сцени.
2. Визначення ділянки обробки.
3. Калібрування радарних даних.
4. Фільтрація спекла (фільтр Gamma Map, фільтр Фроста) [125].
5. Повторна фільтрація спекла (опціонально).
6. Геометрична корекція ділянки обробки.
7. Експорт в формат GeoTIFF.
8. Фільтрація smooth-фільтром.

9. Повторна фільтрація smooth-фільтром (опціонально).

10. Псевдокольорова класифікація.

11. Порівняння з NDVI.

Інша задача моніторингу вирубок лісів була пов'язана з територією Бразилії. Велика лісова територія Амазонки відрізняється важкодоступністю, тому найбільш ефективним підходом до її моніторингу є використання супутників ДЗЗ [36, 51-53, 47, 82, 83, 85, 126]. За даними, наданими бразильським урядом, показник вирубки тропічних лісів Амазонки з серпня 2012 р. по липень 2013 р. зріс на 28%. Було знищено 5843 км² тропічного лісу.

Супутниковий моніторинг вирубок тропічних лісів Амазонки було використано для розв'язання наступних задач:

- виявлення територій і визначення площ незаконних вирубок;
- виявлення порушень діючих правил при виділенні ділянок під промислові або санітарні рубки;
- контроль діяльності на територіях, що постраждали від вирубки лісів;
- аналіз наслідків вирубок, а саме моніторинг динаміки та характеру змін (ерозія ґрунту, відновлення рослинності, заболочування тощо).

Основні вимоги до супутникових знімків, що використовувались для моніторингу вирубок, були наступні:

- зображень повинні бути для однієї території;
- зображення повинні бути отримані для одного сезону;
- зйомка повинна бути проведена однотипними знімальними системами (порівняння знімків можливо тільки за умови відповідності спектральних діапазонів);
- зображення повинні бути однакового або близького просторового розрізнення.

Для супутникового моніторингу вирубок тропічних лісів Амазонки було використано мультиспектральні зображення середнього розрізнення зі супутників Landsat 7 (прилад ETM) і Landsat 8 (прилад OLI) за 2013 р. Вони мають відповідно 8 і 11 спектральних каналів з розрізненням 15 м (панхроматичний канал), 30 м (канали

видимого, ближнього і середнього ІК-діапазонів) і 100 м (канали далекого ІК-діапазону), розташованих у вікнах прозорості атмосфери.

Для коректного порівняння різночасових знімків і точного визначення площі вирубок захмарені пікселі були замасковані.

Для візуальної оцінки площі вирубки тропічних лісів був виконаний спектральний синтез з використанням каналів видимого та ІЧ діапазонів (Рис. 4.12).

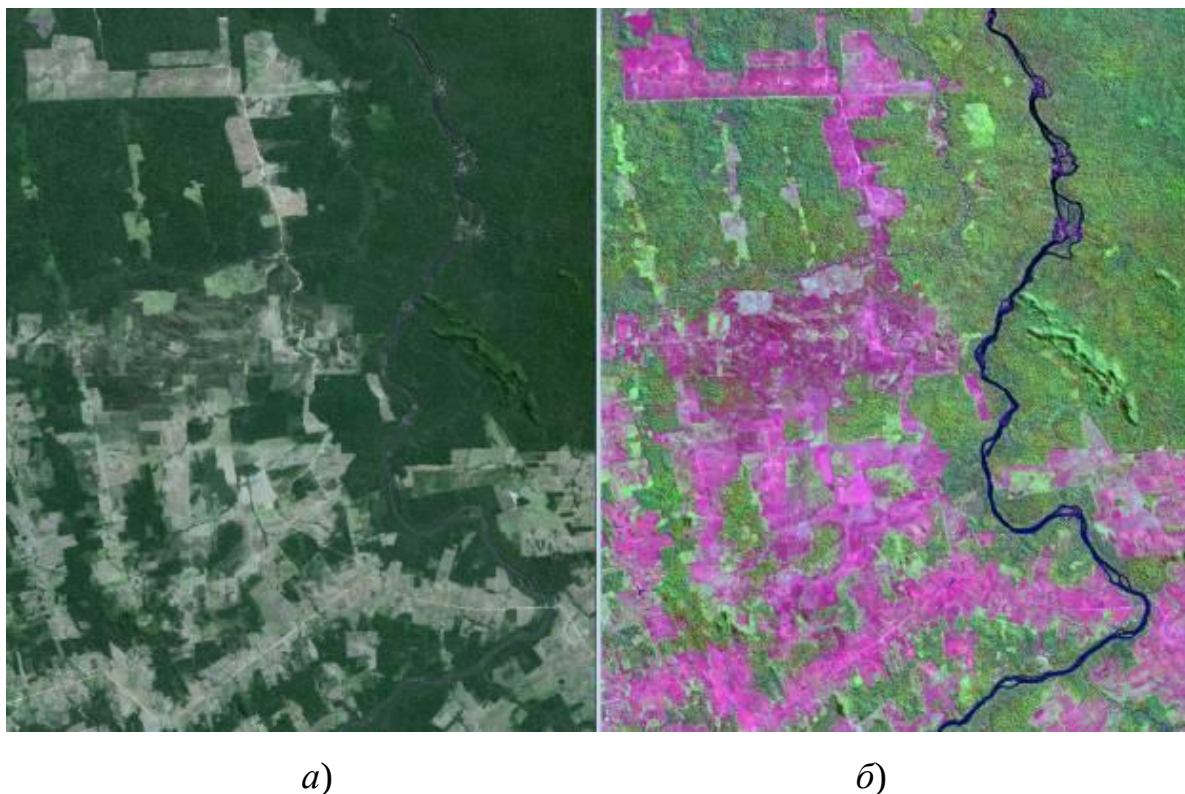


Рисунок 4.12 — RGB-синтез каналів видимого і інфрачервоного діапазону по знімках: а) Landsat 7, 2002 р.; б) Landsat-8, 2013 р.

На синтезованих зображеннях ділянки вирубок чітко виділяються на фоні рослинності завдяки використанню каналів ІК-діапазону. Поріг бінаризації знаходиться в межах 0,2 ... 0,4 і залежить від сезону зйомки. Використання NDVI замість контрольованої класифікації дозволяє повністю автоматизувати обробку знімків. У порівнянні з кластеризацією (наприклад, ISODATA [127]) використання NDVI вимагає набагато менше часу на обчислення і дає більш надійний результат.

Для кількісної оцінки площі вирубки тропічних лісів була виконана обробка знімків заданої ділянки із супутників Landsat 7 за 2002 р. і Landsat 8 за 2013 р., яка включала наступні етапи:

- обрізка знімків по межах заданої території;
- формування маски хмарності по знімку Landsat-7 (Рис. 4.13);
- створення індексних зображень NDVI по знімку Landsat-7 (Рис.4.14, а) і по знімку Landsat-8 (Рис. 4.15, а);
- порогова бінаризація індексного зображення по знімку Landsat-7 (Рис. 4.14, б) і по знімку Landsat-8 (Рис. 4.15, б);
- морфологічна фільтрація бінарного зображення по знімку Landsat-7 (Рис. 4.14, в) і по знімку Landsat-8 (Рис. 4.15, в);
- векторизація бінарного зображення, визначення меж і площі рослинності по знімку Landsat-7 (Рис. 4.14, г) і по знімку Landsat-8 (Рис. 4.15, г);
- формування різницевого зображення, бінаризація, векторизація і визначення меж і площі вирубок (Рис. 4.16);
- візуалізація змін на карті, запис атрибутів об'єктів (площ рубок) в dbf-файл і експорт векторного шару в kml-файл.

4.3 Оцінка збитків від лісових пожеж

Основна проблема боротьби з пожежами полягає в складності їх своєчасного виявлення на величезних площах (особливо в малонаселених областях). Для вирішення цієї проблеми в останні роки широко застосовується супутниковий моніторинг, який в порівнянні зі звичайними способами візуального спостереження поверхні Землі і патрулюванням, надає повне охоплення території лісів. А можливість оперативного спостереження за однією і тією ж територією зі супутників дає велику перевагу цього методу перед іншими, особливо на віддалених та великих за масштабом територіях.

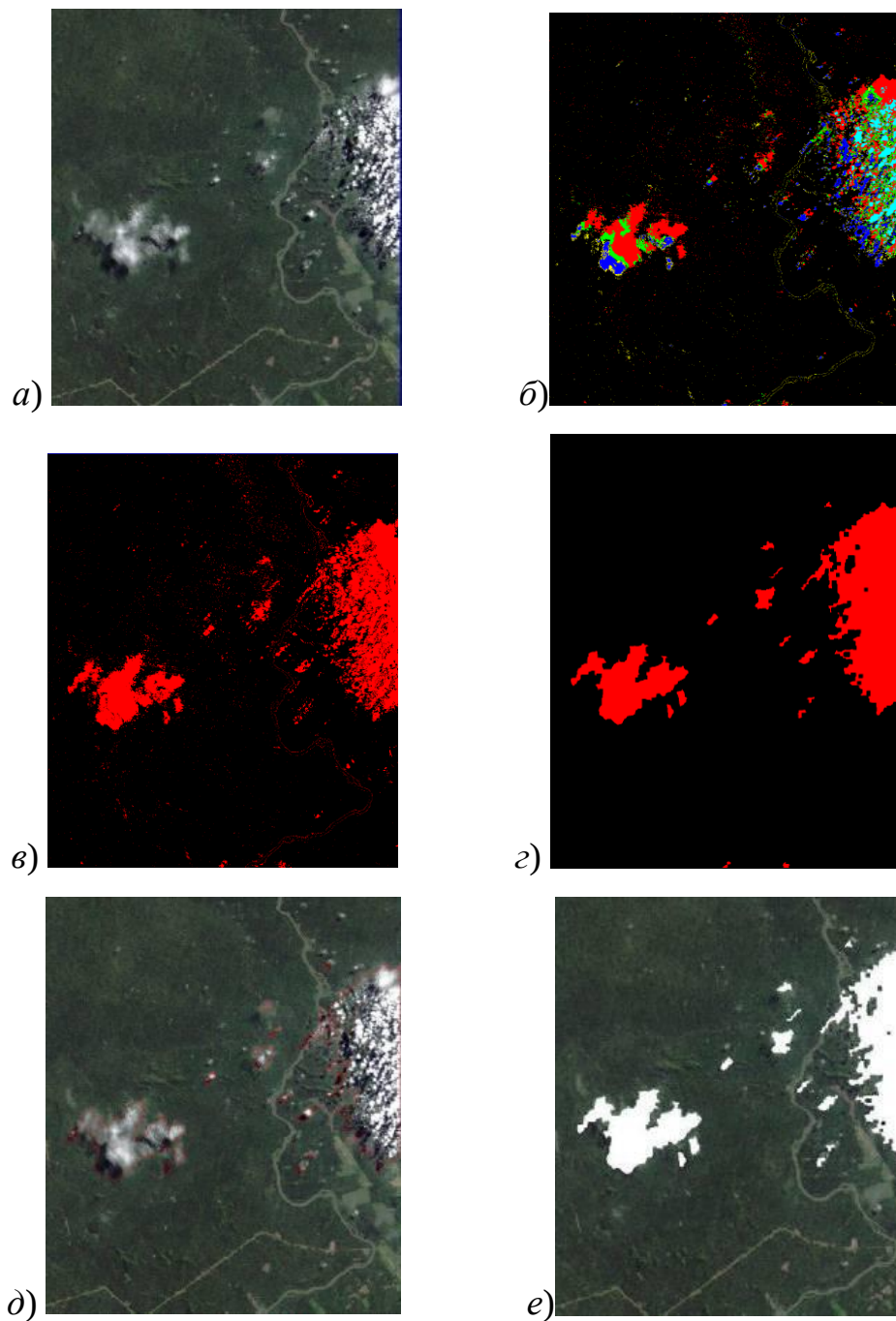


Рисунок 4.13 — Формування маски хмарності по знімку Landsat-7:

- а) вихідний знімок; б) результат класифікації;
- в) результат об'єднання класів; г) результат фільтрації по площі;
- д) векторизація меж хмарності; е) формування маски хмарності

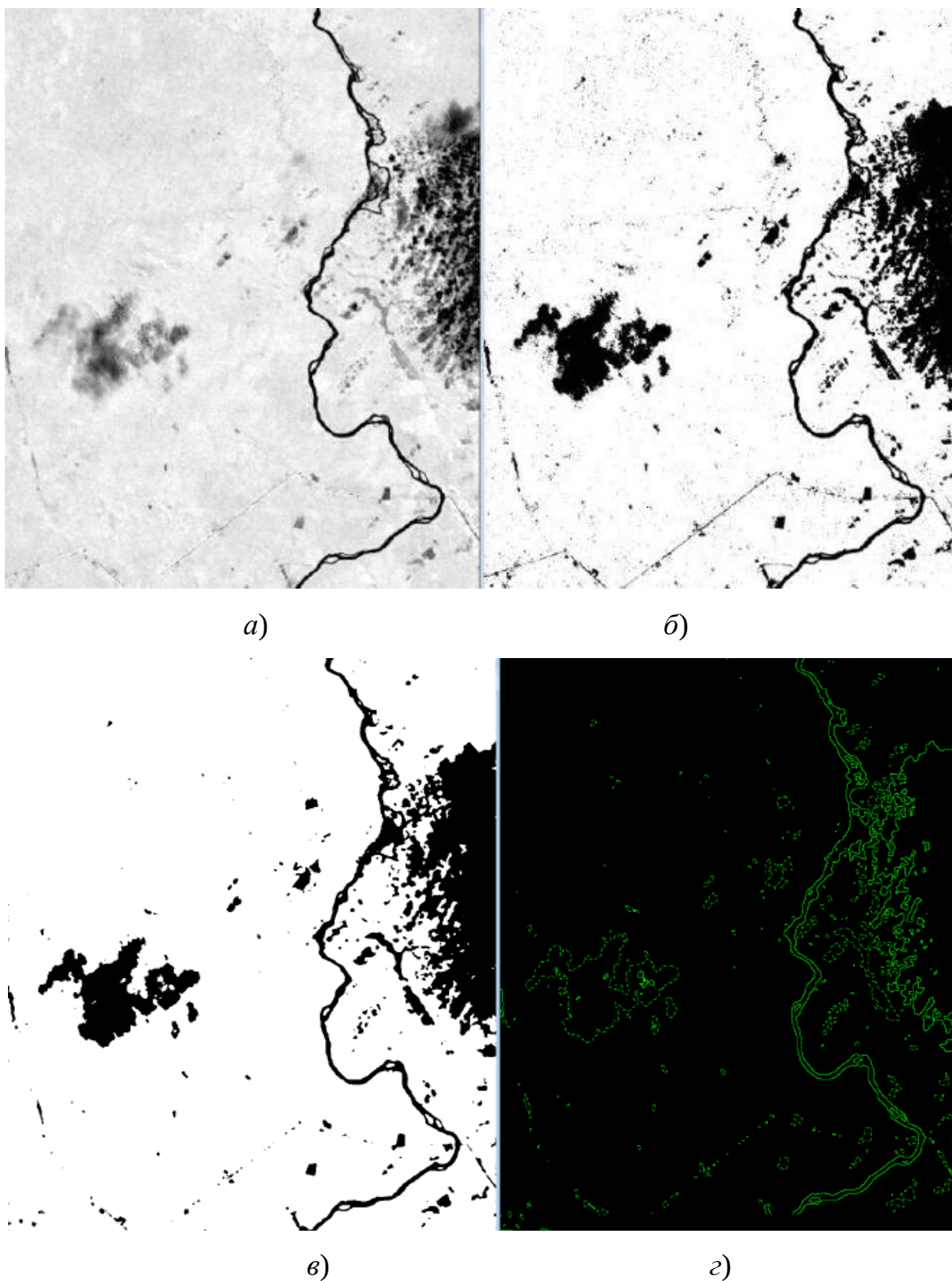


Рисунок 4.14 — Етапи обробки знімка Landsat-7: *а)* індексне зображення NDVI; *б)* бінарне зображення NDVI; *в)* відфільтроване бінарне зображення; *з)* векторне зображення NDVI

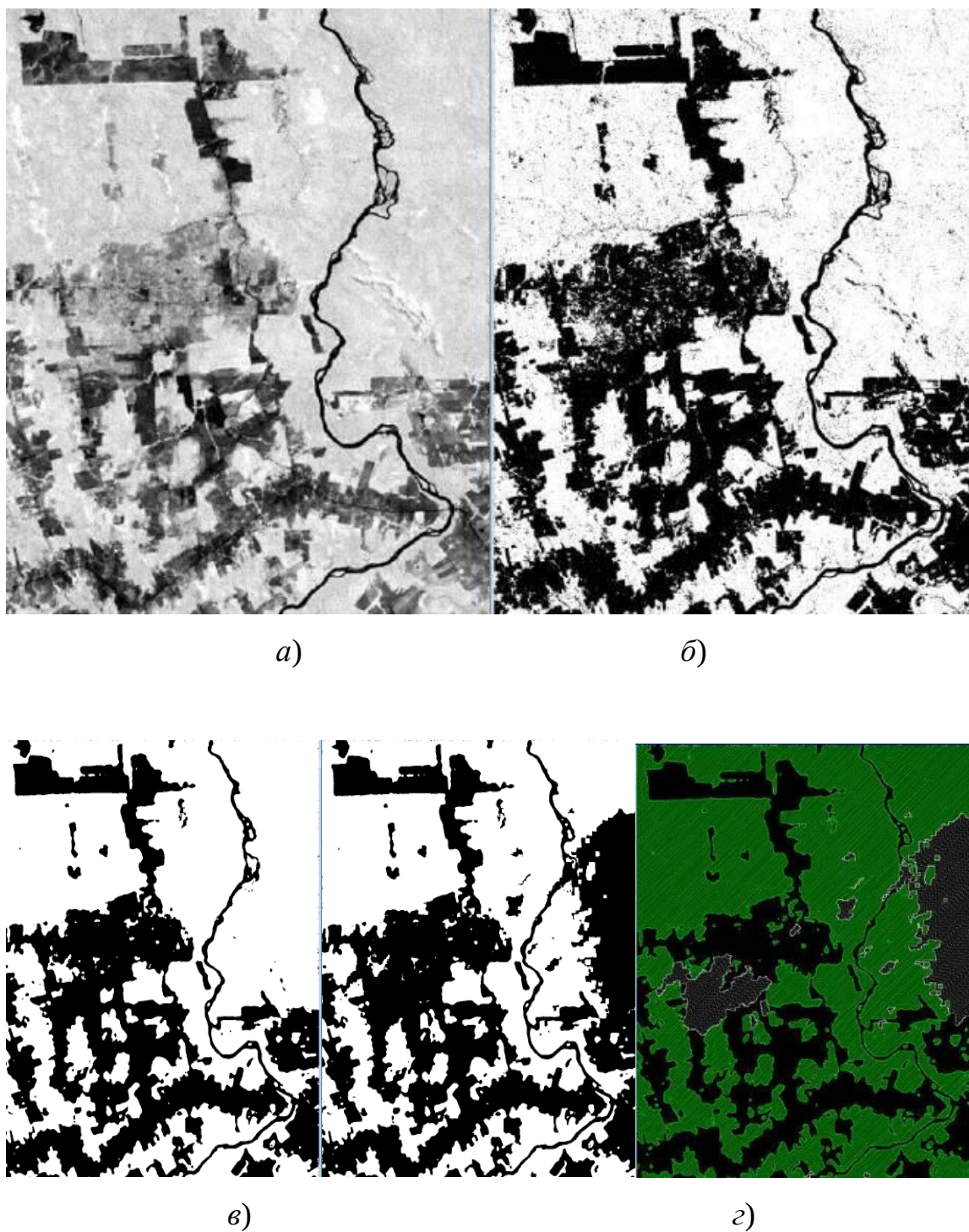
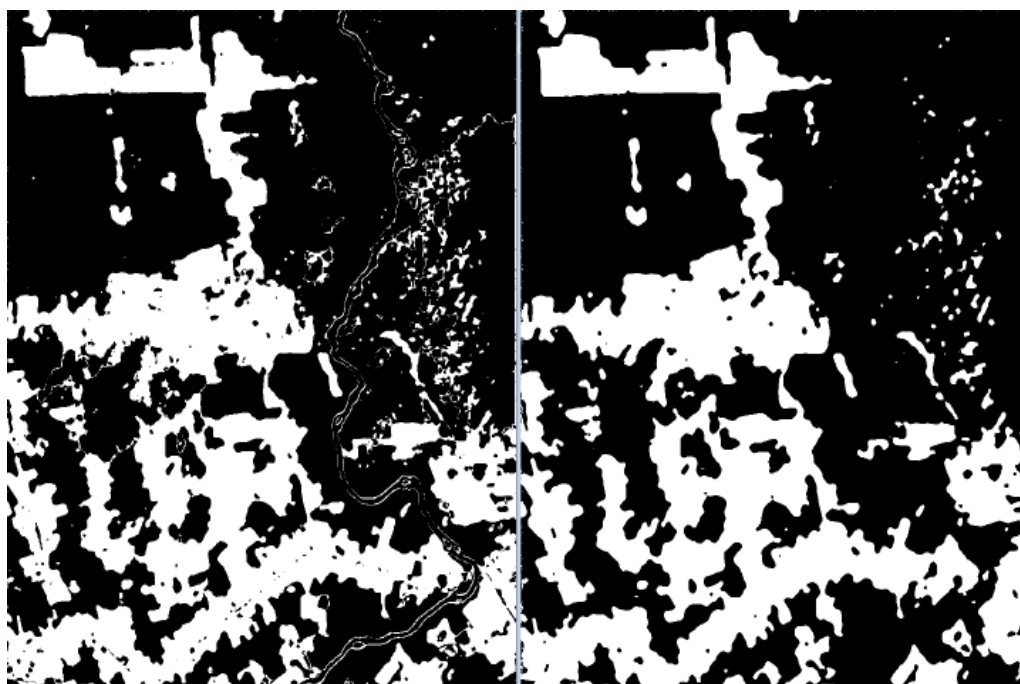


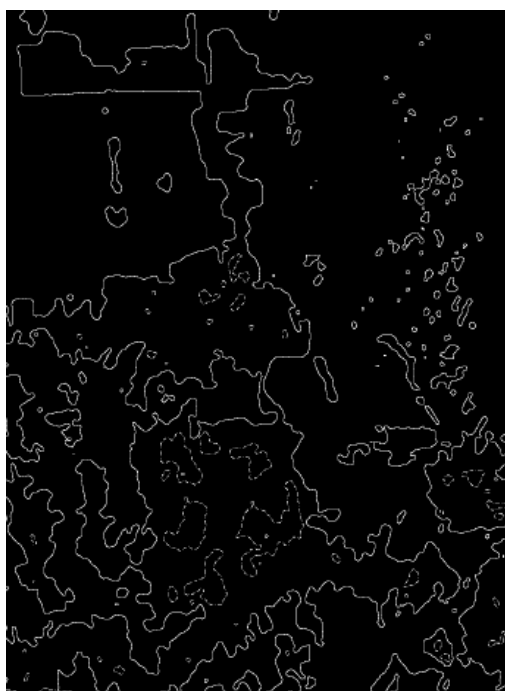
Рисунок 4.15 — Етапи обробки знімка Landsat-8:

- а) індексне зображення NDVI;
- б) бінарне зображення NDVI;
- в) відфільтроване бінарне зображення;
- г) векторний шар з маскою хмарності



а)

б)



в)



г)

Рисунок 4.16 — Визначення меж і площі вирубок зі знімків Landsat-7 та Landsat-8: а) різницеve зображення NDVI; б) відфільтроване бінарне зображення; в) векторне зображення; г) векторний шар з маскою хмарності

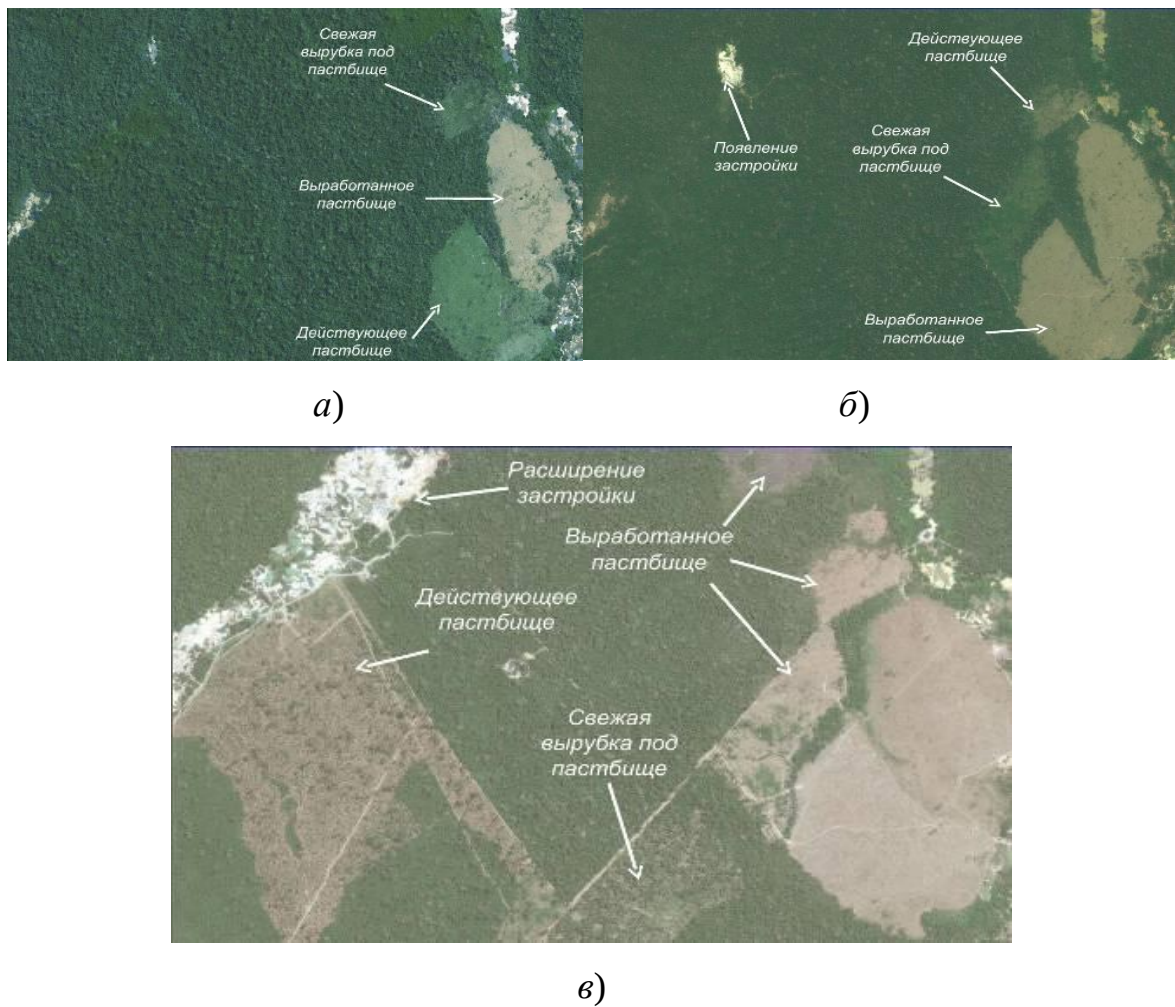


Рисунок 4.17 — Межі забудови, вирубок і пасовищ:

- а) фотограмметричне зображення, фіксація вирубок у 2010 р.;
- б) фотограмметричне зображення, фіксація вирубок у 2012 р.;
- в) фотограмметричне зображення, фіксація вирубок у 2014 р.

Для дистанційного виявлення та моніторингу активно діючих пожеж в світі існують спеціальні служби, що використовують дані з супутників Terra, Aqua (прилад MODIS) і NOAA (прилад AVHRR), що забезпечують щоденне багаторазове покриття всієї території суші зображеннями низького розрізнення. Відкритий доступ до цих зображень дозволяє проводити оперативний контроль лісових масивів на всій території Землі з більш низькою в порівнянні з патрулюванням та стаціонарними методами виявлення вартістю.

Оцінка економічних і екологічних наслідків лісових пожеж вимагає своєчасного отримання об'єктивних даних про стан пошкоджених лісових насаджень, в тому числі, про наявність в їх складі сухих дерев. Такого роду дані виходять, як правило, епізодично в ході наземних лісопатологічних обстежень, що охоплюють, в силу трудомісткості використовуваних методів і слабкої доступності лісів на значній частині території, незначну частину площі пошкоджених пожежами насаджень. Це спонукає до розвитку альтернативних методів оцінки стану пошкоджених пожежами лісних масивів на основі обробки та аналізу супутникових зображень.

Однак, низьке просторове розрізнення приладів MODIS і AVHRR (розмір пікселя 1x1 км) не дозволяє з прийнятною точністю визначати площі і ступінь ураження лісових масивів. Тому для оцінки наслідків лісових пожеж використовуються дані з супутників Landsat, SPOT і RapidEye, що забезпечують періодичне покриття всієї території суші знімками середнього і високого просторового розрізнення.

У роботі, наведено результати обробки та аналізу багатоспектральних супутникових зображень низького і середнього просторового розрізнення з метою оцінки наслідків лісових пожеж на території Каліфорнії за допомогою інформаційних систем хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних. За даними супутника Landsat 8 (знімальний прилад OLI) визначено межі вигорілих ділянок і розрахована площа постраждалої території.

Щорічно, в світі виникає в середньому близько 400 тис. лісових пожеж, які завдають величезної шкоди лісовому фонду, знищуючи мільйони гектарів лісових насаджень, що становить до 0,5 - 1% всіх лісів на Землі. Крім прямого збитку лісам, в повітря потрапляють значні обсяги вуглекислого газу і продуктів згоряння деревини. На частку лісових пожеж припадає близько 60% всіх деревостанів, щорічно гинуть від негативного впливу всього комплексу антропогенних і природних чинників. У категорію гарей переходить від 10 до 20% щорічно охоплюється вогнем площі, а на решті частини цієї площі фіксуються пошкодження лісів різної інтенсивності.

В даний час США є світовим лідером як за кількістю щорічно фіксуються лісових пожеж, так і по площі постраждалих територій. При цьому штат Каліфорнія є одним з найбільш пожежонебезпечних в частині лісових пожеж незважаючи на постійне вдосконалення засобів і методів запобігання, раннього виявлення та боротьби як з самими пожежами, так і з їх наслідками. Особливо актуальною проблема лісових пожеж в Каліфорнії стала в останні роки в зв'язку з посиленням посухою. Основна проблема боротьби з пожежами полягає в складності їх своєчасного виявлення на величезних площах (особливо в малонаселених областях). Для вирішення цієї проблеми в останні роки стала широко застосовуватися супутникова зйомка, яка в порівнянні зі звичайними способами візуального спостереження з поверхні Землі і патрулювання, надає повне охоплення території лісів. Крім того, можливість оперативного спостереження за однією і тією ж територією зі супутників дає велику перевагу цього методу перед іншими, особливо на віддалених від великих агломерацій територіях. Супутникові зображення дозволяють виявляти пошкоджені ділянки лісу на великих територіях і діагностувати тип ушкоджень. Надалі їх використання для процесу моніторингу дозволяють спостерігати за відновлення лісу та оперативно реагувати при появі нових вогнищ.

Для проведення супутникового моніторингу наслідків лісових пожеж, що виникли в США в липні – серпні 2015р була обрана територія штату Каліфорнія. Для визначення місця розташування пожеж та їх динаміки були використані зображення зі супутників Terra і Aqua, які мають поле зору оптичної системи 110° і забезпечують оглядову зйомку всієї поверхні Землі з періодичністю 2 рази на добу (ширина смуги захоплення 2330 км). Знімальний прилад MODIS має 36 спектральних каналів з просторовим розрізненням 250 ... 1000 м і радіометричним розрізненням 12 біт, що дозволяє спостерігати різні природні об'єкти і вирішувати широкий спектр науково-прикладних задач.

На Рис. 4.18-4.19 наведена динаміка розвитку лісової пожежі на обраній території в липні – серпні 2015р за даними з супутників Terra і Aqua (знімальний прилад MODIS). Зображення відповідають комбінації каналів видимого діапазону (1-4-3), а нижні - видимого і теплового діапазонів (7-2-1).

Для більш детального аналізу наслідків пожежі використовувались зображення зі супутника Landsat 8 (знімальний прилад OLI), який має 7 спектральних каналів видимого і інфрачервоного діапазонів (Табл. 1) з радіометричним розрізненням 11 біт.

На Рис. 4.20-4.21 показані наслідки лісової пожежі на обраній території в липні – серпні 2015р. за даними з супутника Landsat 8 (OLI).

Таблиця 4.1 Спектральні канали Landsat 8 (OLI)

Спектральний канал	Довжини хвиль	Просторова роздільна здатність
Канал 1 - Узбережжя і аерозолі	0.433 - 0.453 мкм	30 м
Канал 2 - Синій	0.450 - 0.515 мкм	30 м
Канал 3 - Зелений	0.525 - 0.600 мкм	30 м
Канал 4 - Червоний	0.630 - 0.680 мкм	30 м
Канал 5 - Близький ІЧ	0.845 - 0.885 мкм	30 м
Канал 6 – Середній ІЧ	1.560 - 1.660 мкм	30 м
Канал 7 - Середній ІЧ	2.100 - 2.300 мкм	30 м
Канал 8 - Панхроматичний	0.500 - 0.680 мкм	15 м
Канал 9 - Перисті хмари	1.360 - 1.390 мкм	30 м

Для кількісної оцінки наслідків лісової пожежі в липні– серпні 2015р була виконана обробка зображень зі супутника Landsat 8, яка включала:

- попередні операції (вибір області інтересів, пошук супутникового зображення за датою і контроль якості зображення);

- спектральний синтез в натуральних кольорах і в штучних квітах з використанням теплових каналів;
- створення індексного зображення *NBR*;
- порогову бінаризація індексного зображення;
- морфологічну фільтрацію бінарного зображення;
- векторизацію бінарного зображення і розрахунок площі гарей;
- візуалізацію змін на карті і експорт векторного шару в kml-файл.

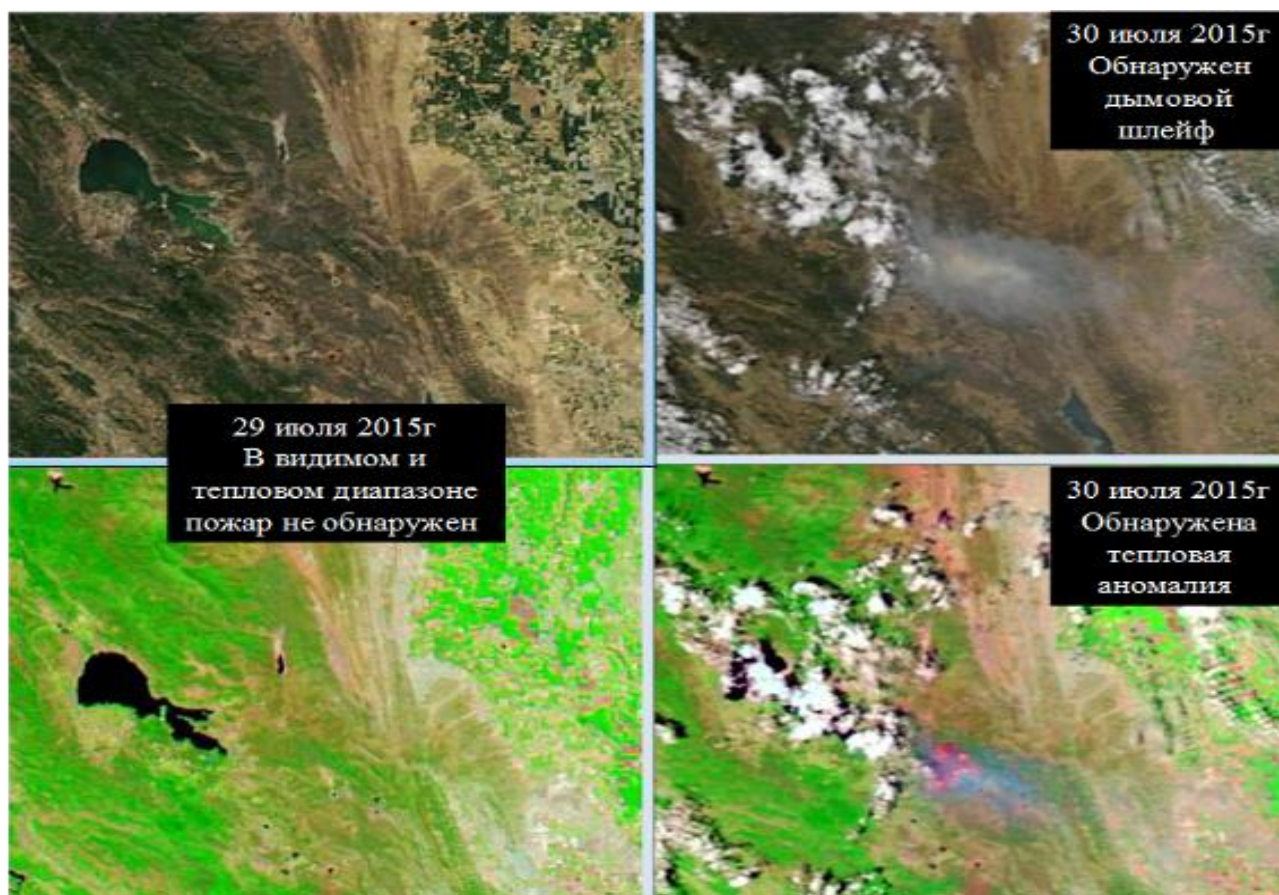


Рисунок 4.18 – Зображення MODIS за 29 і 30 липня 2015р.

Індексне зображення *NBR* (Normalized Burn Ratio) дозволяє визначити на супутниковому зображенні, території вигорання по спектральним каналах ближнього ІК (*NIR*) і середнього ІК (*SWIR*) діапазонів за формулою:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR). \quad (4.8)$$

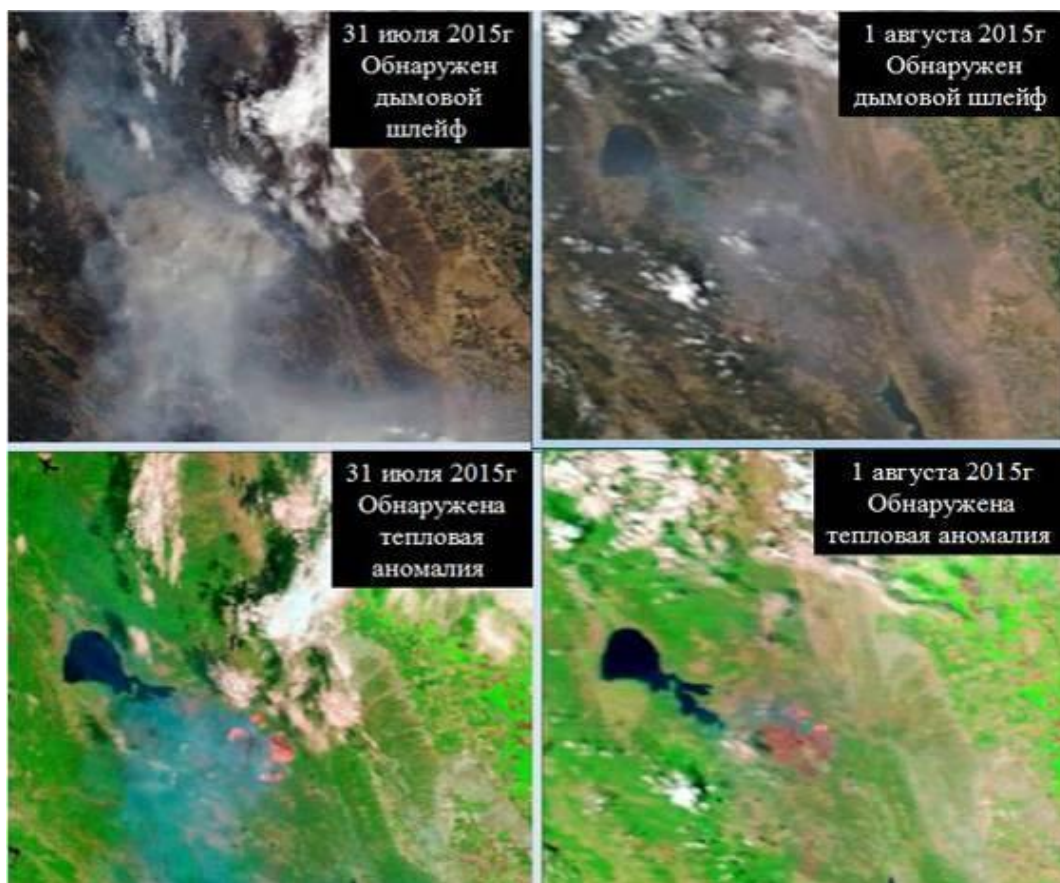


Рисунок 4.19 – Зображення MODIS за 31 липня та 1 серпня 2015р.

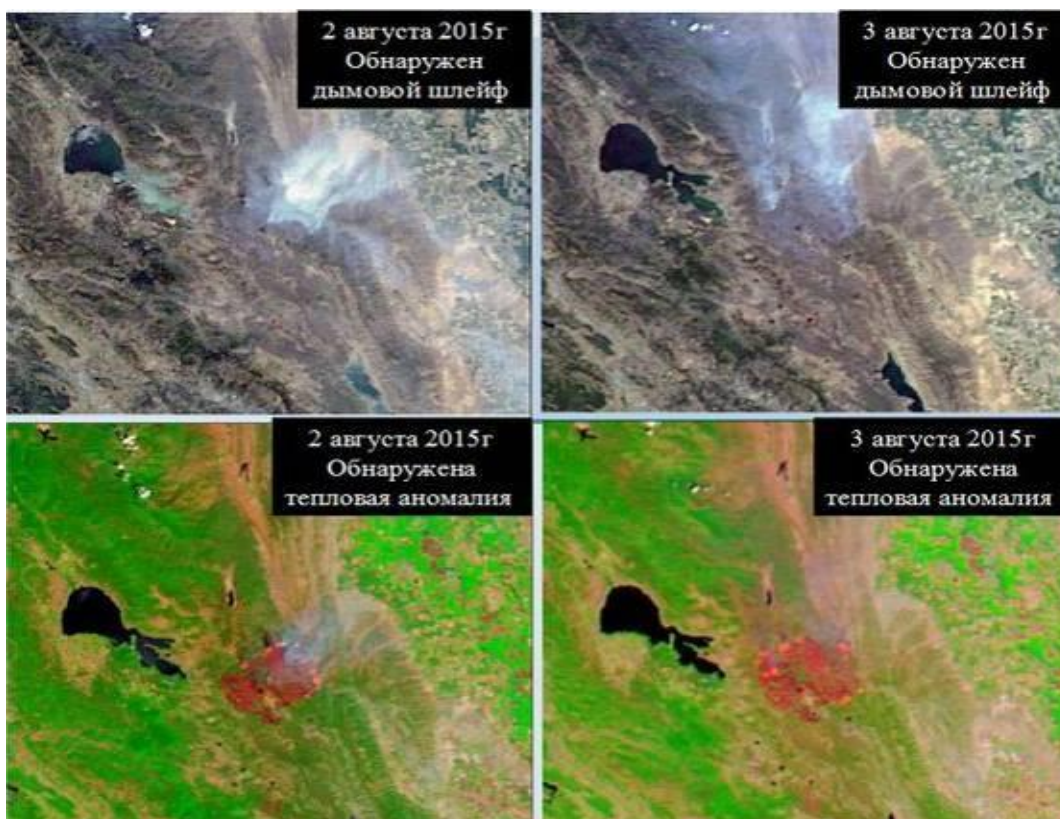


Рисунок 4.20 – Зображення MODIS за 2 і 3 серпня 2015р.

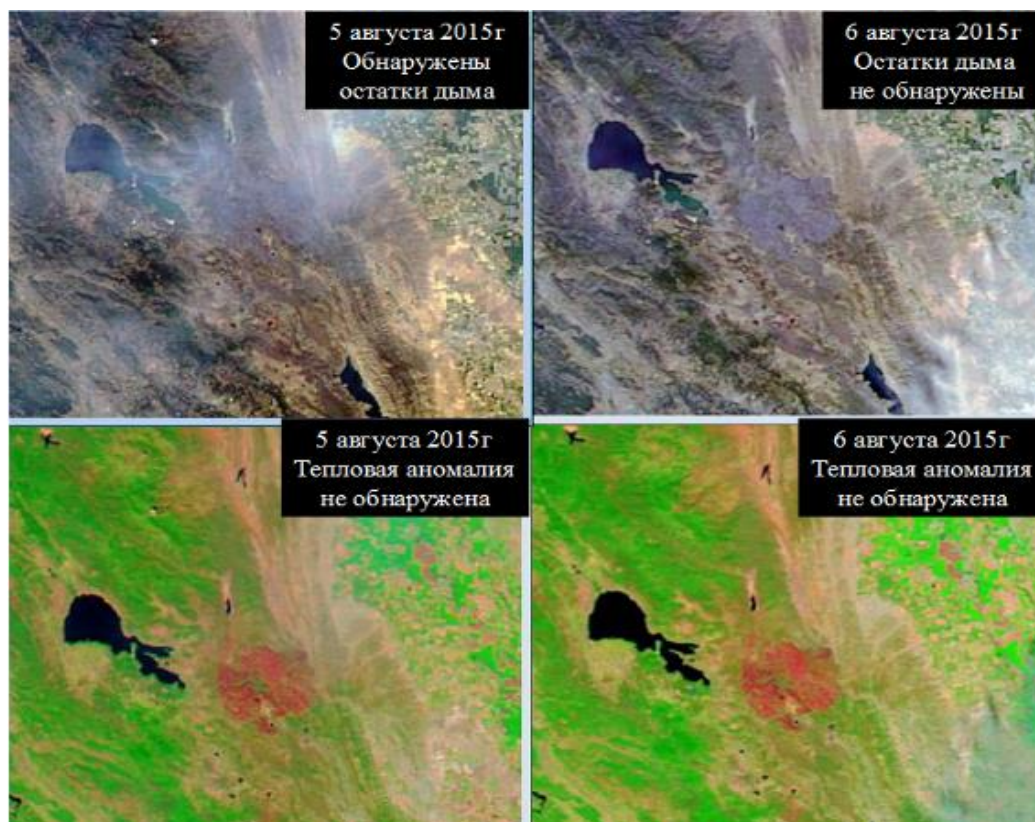


Рисунок 4.21 – Зображення MODIS за 5 і 6 серпня 2015р.

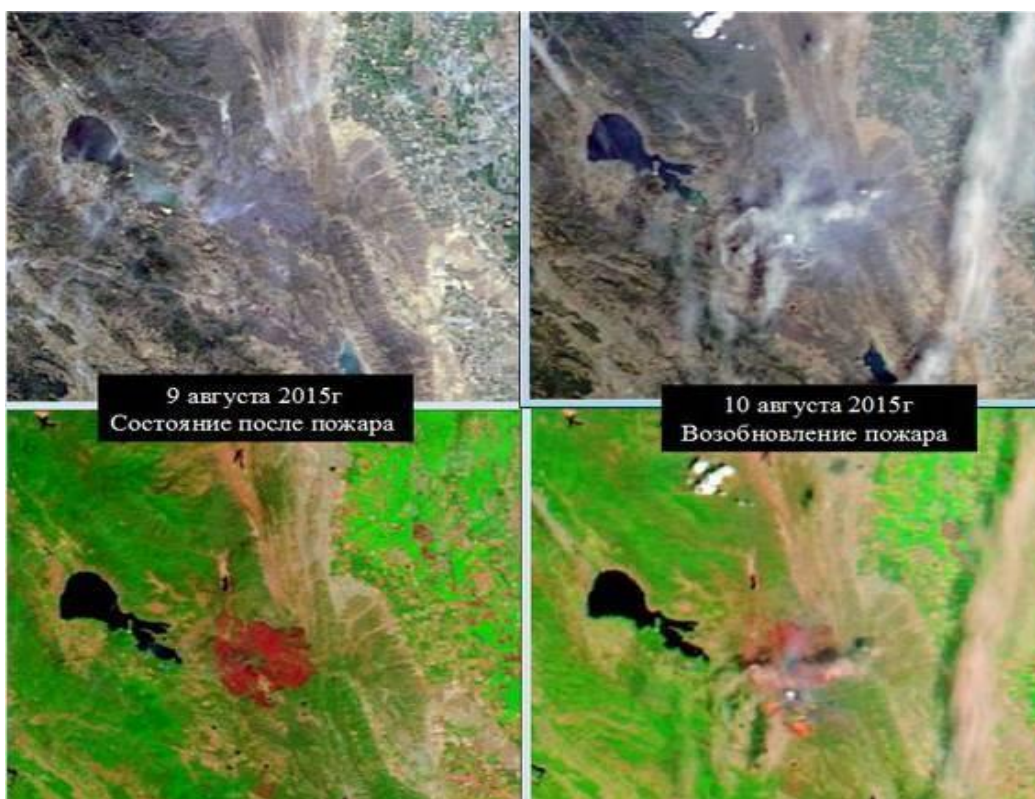


Рисунок 4.22 – Зображення MODIS за 9 та 10 серпня 2015р.

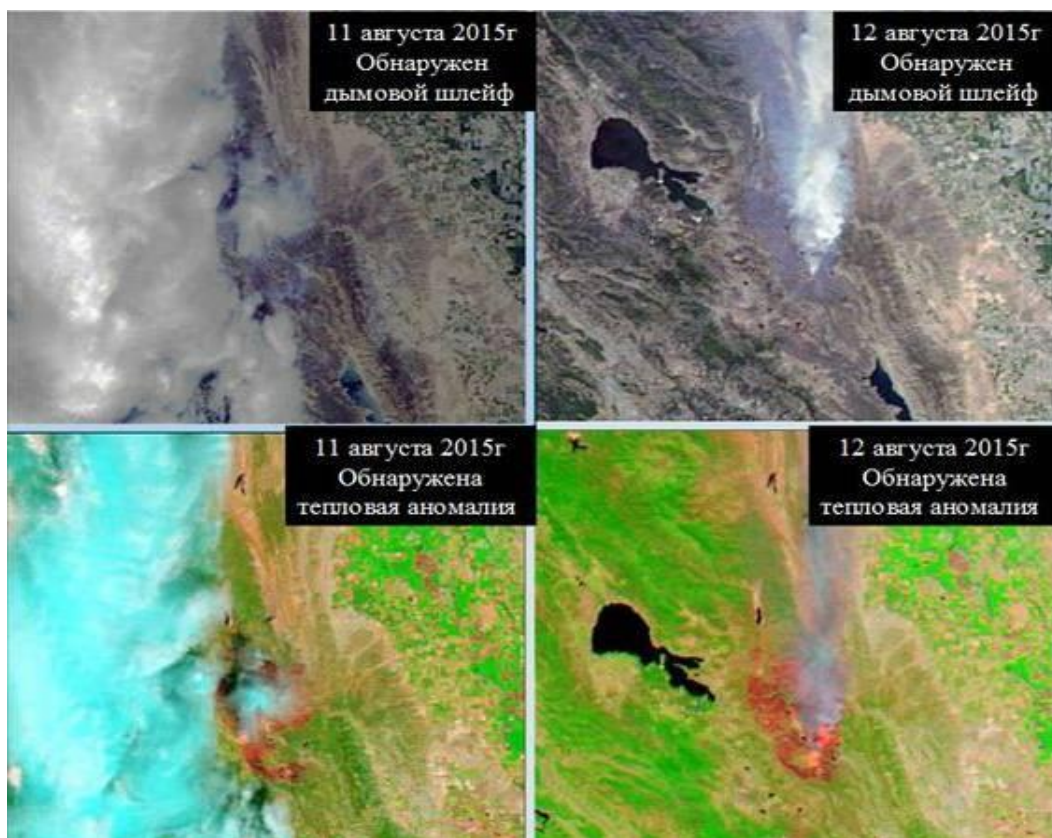


Рисунок 4.23 – Зображення MODIS за 11 і 12 серпня 2015р.

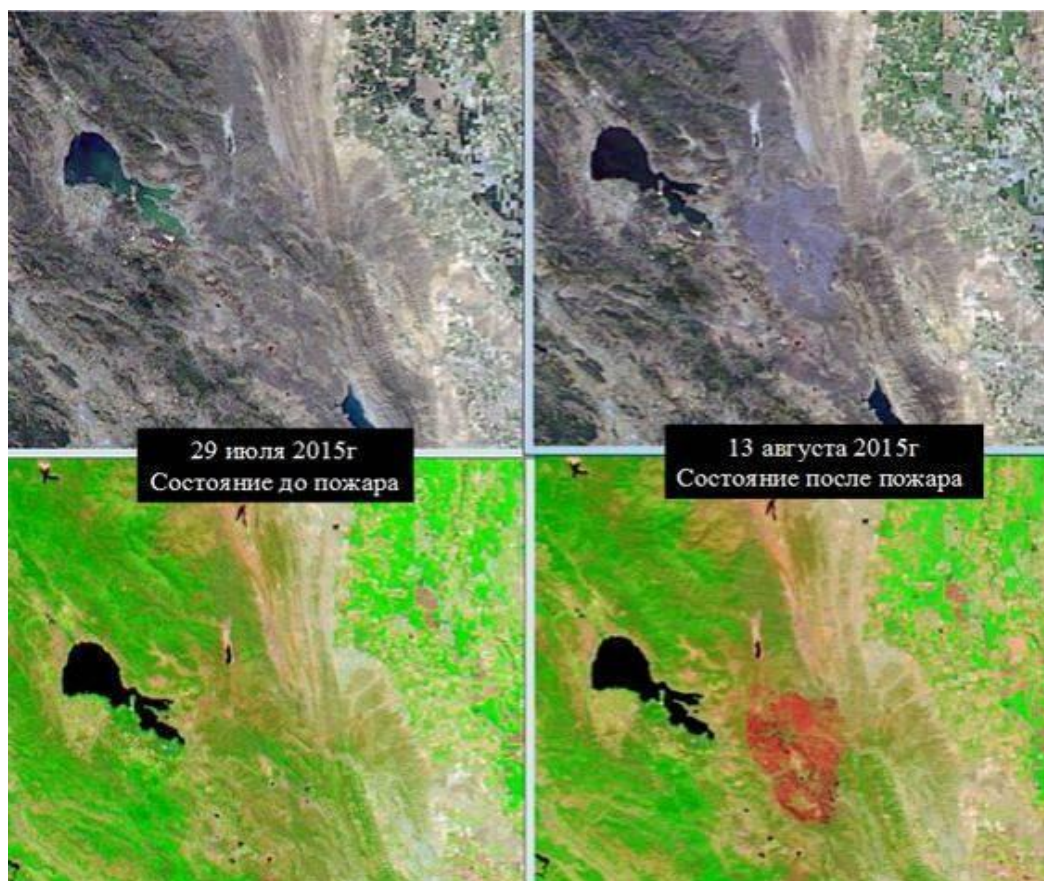


Рисунок 4.24 – Зображення MODIS за 29 липня і 13 серпня 2015 р.

Вираз використовує істотну відмінність коефіцієнтів відбиття (альbedo) в спектральних каналах ближнього ІК і середнього ІК діапазонів, відповідних здоровому лісі і вигорілим територіям: в ближньому ІЧ діапазоні більш високе альbedo у здорового лісу, а в середньому - гар. На Рис. 4.25 показаний результат обробки зображення із супутника Landsat 8 за 19 серпня 2015р. Площа згорілого лісу на спостережуваній території в період з 30 липня по 12 серпня 2015 р склала більше 41 477 гектарів.

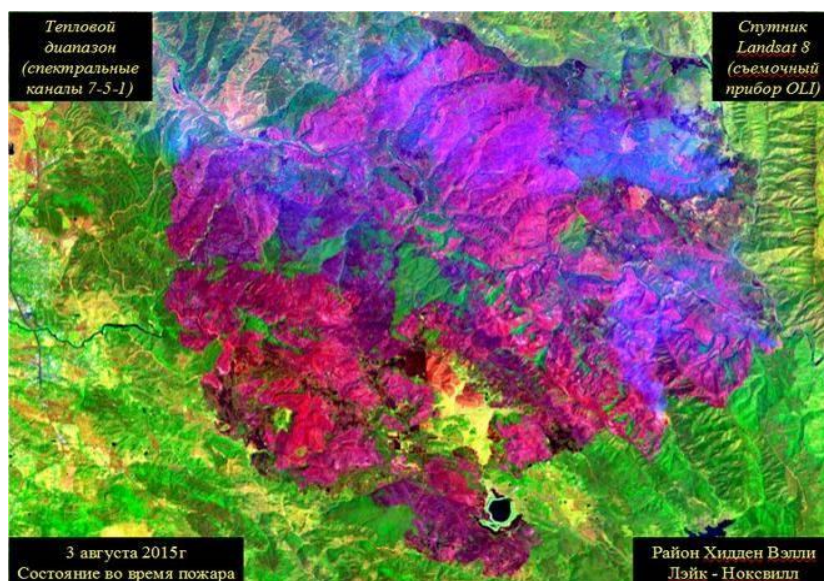


Рисунок 4.25 – Зображення із супутника Landsat 8 за 3 серпня 2015р (видимий і тепловий діапазон)

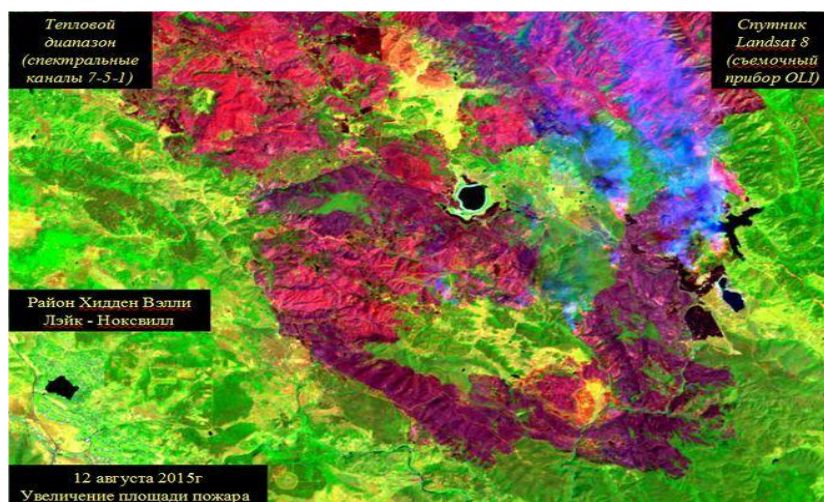


Рисунок 4.26 – Зображення із супутника Landsat за 12 серпня 2015р (видимий і тепловий діапазон)

На відміну від відомих методів визначення площ вигорілих територій по різночасовим супутниковим знімкам з використанням диференційованого нормалізованого індексу гару ($dNBR$), запропонована технологія дозволяє більш точно визначати вигорілі ділянки завдяки незалежному визначенню оптимальних порогів бінаризації для кожного зображення. Крім того, технологія надає можливість аналізувати часові зміни на постраждалих ділянках лісу для тривалих періодів спостереження, використовуючи створені векторні шари з атрибутивною інформацією.

Розроблена технологія входить в один із модулів інформаційних систем хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних, що дозволяє проводити регулярний супутниковий моніторинг наслідків лісових пожеж. Користувачами інформаційної системи можуть бути державні контролюючі структури, страхові компанії, енергетичні і нафтопереробні компанії, муніципальні служби, приватні компанії, фермери, телерадіокомпанії та ін. Засоби масової інформації, населення, яке проживає поблизу територій, які постраждали від лісових пожеж.

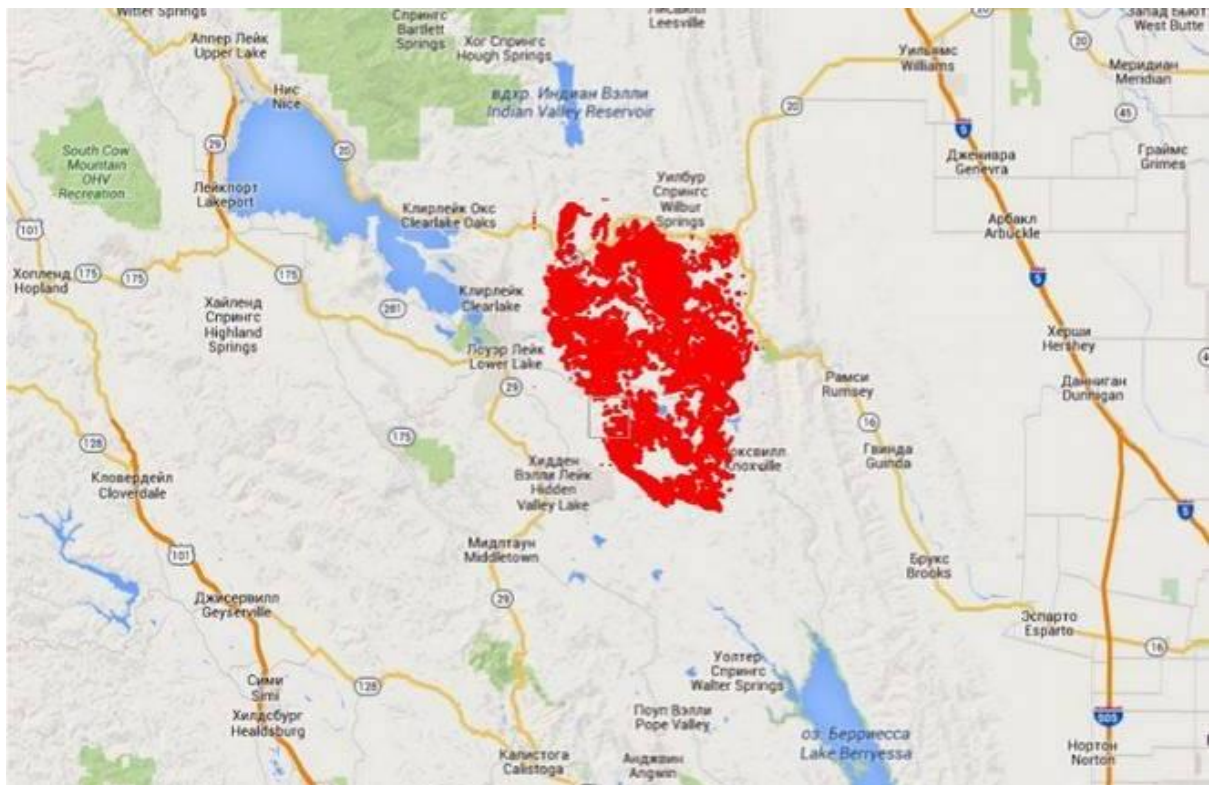


Рисунок 4.27 – Накладення векторного шару на цифрову карту

4.4 Моніторинг посух

4.4.1 Технологія моніторингу сільськогосподарських посух

Технологія моніторингу сільськогосподарських посух полягає в безперервному зборі наземних і супутникових даних, метеоданих, побудові і аналізі часових рядів метеорологічних показників.

Найкраще часове розрізнення мають дані наземних спостережень, які оновлюються кожні 30 хвилин. В залежності від періодичності моніторингу (доба, тиждень, 8 діб і т.п.) проводиться узагальнення даних (усереднення температури, підсумовування опадів). Метеостанції країни утворюють нерегулярну мережу, і за межами вузлів мережі метеопараметри визначаються або за даними найближчої метеостанції, або за допомогою інтерполяції. Однак, в деяких випадках дані метеостанцій, розташованих за межами великих населених пунктів, можуть містити пропуски, перш за все, відсутність даних по опадам. Відстань між метеостанціями може становити кілька десятків кілометрів і істотно перевищувати розміри пікселів растрів супутникових метеоданих. Дані космічних зйомок володіють більш високим просторовим розрізненням, однак можуть містити неточності, обумовлені впливом хмарності. Пікселі растрів, розташовані на кордонах масок хмарності і тіней, нерідко містять змішані значення показника, що відрізняються від фактичних наземних даних [52, 54]. Вибір джерела метеоданих визначає спосіб представлення результату (Табл. 4.2). Початок збору метеорологічних даних визначається датою стійкого осіннього переходу середньодобової температури через порогову (наприклад, $+ 5^{\circ} \text{C}$ для соняшника). З цього моменту ґрунт починає накопичувати вологу. Під стійким переходом температури повітря через певну градацію приймають той день, після якого зворотного переходу або не спостерігається, або він присутній, але сума негативних відхилень середньої добової температури від відповідної градації перевищує по модулю суму позитивних відхилень [52, 55]. Завершальною датою збору метеоданих за осінньо-зимовий період є дата стійкого весняного переходу через межу середньодобову температуру (наприклад, $+ 10^{\circ} \text{C}$

для соняшника). Граничні значення визначаються особливостями вегетації сільськогосподарських культур.

Таблиця 4.2 Представлення результатів моніторингу

Метеодані	Результат	Коментар
Наземні	Точечні	Векторний шар показників посухи у точках метеостанцій
Супутникові	Охоплюючий великий масштаб території	Растр показників посухи і растрова (векторна полігональна) маска посушливих ділянок

За осінньо – зимовий період проводиться оцінка накопичених опадів та формування запасів продуктивної вологи, за весняно – літній період – оцінка сезонного зволоження ґрунтів і температури. Аналізу піддаються як безпосередньо значення метеопараметрів, так і їх комбінації – показники посух. Особливу загрозу для врожаю представляють ґрунтові посухи на стадії появи ранніх сходів. Тривалість часового ряду супутникових і наземних метеоданих повинна становити не менше 5 років. Це дозволить оцінити середньо – багаторічні значення показників.

Появі сходів озимих і ярих культур загрожує ґрунтова посуха в період сівби [52, 54]. Тому в осінній період, початок моніторингу може збігатися з початком посівної кампанії - наприклад, з 01 вересня. В період весняної сівби моніторинг може починатися з другої декади квітня.

Таблиця 4.3 Класифікація засух за даними сервісу USDM

Category	Description	Possible Impacts	Palmer Drought Severity Index (PDSI)	CPC Soil Moisture Model (Percentiles)	USGS Weekly Streamflow (Percentiles)	Standardized Precipitation Index (SPI)	Objective Drought Indicator Blends (Percentiles)
D0	Abnormally Dry	- Going into drought: - short-term dryness slowing planting, growth of crops or pastures - Coming out of drought: - some lingering water deficits - pastures or crops not fully recovered	-1.0 to -1.9	21 to 30	21 to 30	-0.5 to -0.7	21 to 30
D1	Moderate Drought	- Some damage to crops, pastures - Streams, reservoirs, or wells low, some water shortages developing or imminent - Voluntary water-use restrictions requested	-2.0 to -2.9	11 to 20	11 to 20	-0.8 to -1.2	11 to 20
D2	Severe Drought	- Crop or pasture losses likely - Water shortages common - Water restrictions imposed	-3.0 to -3.9	6 to 10	6 to 10	-1.3 to -1.5	6 to 10
D3	Extreme Drought	- Major crop/pasture losses - Widespread water shortages or restrictions	-4.0 to -4.9	3 to 5	3 to 5	-1.6 to -1.9	3 to 5
D4	Exceptional Drought	- Exceptional and widespread crop/pasture losses - Shortages of water in reservoirs, streams, and wells creating water emergencies	-5.0 or less	0 to 2	0 to 2	-2.0 or less	0 to 2

Засуха присутня в разі, якщо:

1. Опади відсутні протягом 15-30 діб при короткій посухи і більше 30 діб - при тривалій.
2. Спостерігаються аномалії температури (вище $+30^{\circ}\text{C}$) при відсутності опадів або при їх незначній кількості. При підвищенні температури до $+40^{\circ}\text{C}$ можливо припустити ґрунтову посуху.
3. В період весняної сівби спостерігаються низькі температури (нижче середніх багаторічних) при відсутності опадів протягом більше 15-30 діб.

У відповідність з показниками стану рослинності посіви культур знаходяться в пригніченому стані. При цьому в діапазоні дат моніторингу спостерігаються екстремуми температури і періоди відсутності опадів. За даними сервісу NDMC в залежності від діапазону значень індексів розрізняють 5 категорій засух (Табл. 4.3). Категорії посух на основі індексів зволоження представлені в Табл. 4.4.

Таблиця 4.4 Категорії посух на основі індексів зволоження

Значення індексу				Категорія посухи	Умовне позначення посухи
ГТК	S	SPI	PDSI		
–	0,00...0,99	–	-0,99...-0,01	Початок сухого періоду	0
0,70...1,00	1,00...1,99	-0,99...0,00	-1,99...-1,00	М'яка	1
0,51...0,69	2,00...2,99	-1,49...-1,00	-2,99...-2,00	Помірна	2
0,40...0,50	$\geq 3,00$	-1,99...-1,50	-3,99...-3,00	Сильна	3
$\leq 0,39$	–	$\leq -2,00$	$\leq -4,00$	Екстремальна	4

На растрових картах показників зволоження, температури і стану рослинності виділяються групи пікселів з аномальними значеннями, формуються просторові кластери і їх растрова маска (або векторні полігональні шари).

Моніторинг посух пропонується здійснювати на основі часового ряду TCI, VCI, VHI для районів з присутністю і відсутністю посухи. Розроблений метод

інтегровано до інформаційної системи хмарного сервісу дозволяє побудувати картограми по часових рядах TCI, VCI, VHI.

Технологія моніторингу сільськогосподарських посух має наступні етапи:

- Завантаження у хмарне середовище супутникових даних з ресурсу Blended Vegetation Health Product. Ці дані представляють собою ряд знімків (AVHRR з 1981 по 2012, VIIRS з 2013 по теперішній час) з просторовим розрізненням 4 км.
- Визначення області моніторингу на рівні адміністративної одиниці (район, область, країна).
- Обрізка зображення по кордонам адміністративної одиниці. Для цього зображення об'єднані в стеки (VHI.tif, TCI.tif, VCI.tif) та використовуються векторні дані кордонів адміністративних одиниць. За структурою супутникові зображення формуються тільки на території суші, якщо трапляється водна поверхня вона автоматично обрізається за відсутності даних.
- Період моніторингу визначається користувачем. Необхідно вказати номер тижня початку моніторингу та номер тижня його закінчення.
- Побудова картограм часових рядів TCI, VCI, VHI за вказаною адміністративною одиницею. При побудові картограм використовується класифікація за діапазонами значень (Табл. 4.5).

Таблиця 4.5 Класифікація VCI, TCI і VHI колірні схеми для вегетативної посухи

Drought	Values	VCI	TCI	VHI
Extreme	<10			
Severe	<20			
Moderate	<30			
Midl	<40			
No	≥40			



Рисунок 4.28 – Картограми ТСІ за даними часового ряду
1.04.2017 - 01.08.2017 р. для Іванівського району Херсонської області

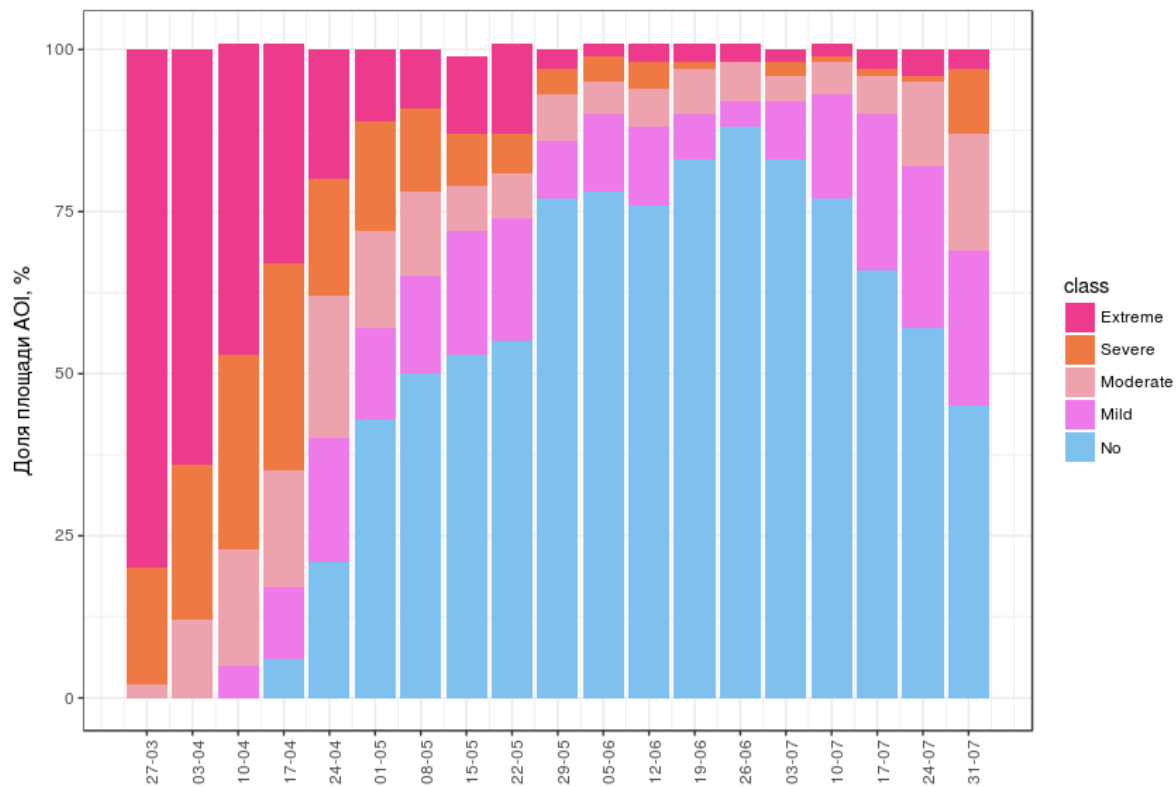


Рисунок 4.29 – Визначення долі площі з показниками ТСІ за даними часового
ряду 1.04.2017 - 01.08.2017 р. для Іванівського району Херсонської області



Рисунок 4.30 – Картограми VCI за даними часового ряду з 1.04.2017 по 01.08.2017 р. для Іванівського району Херсонської області

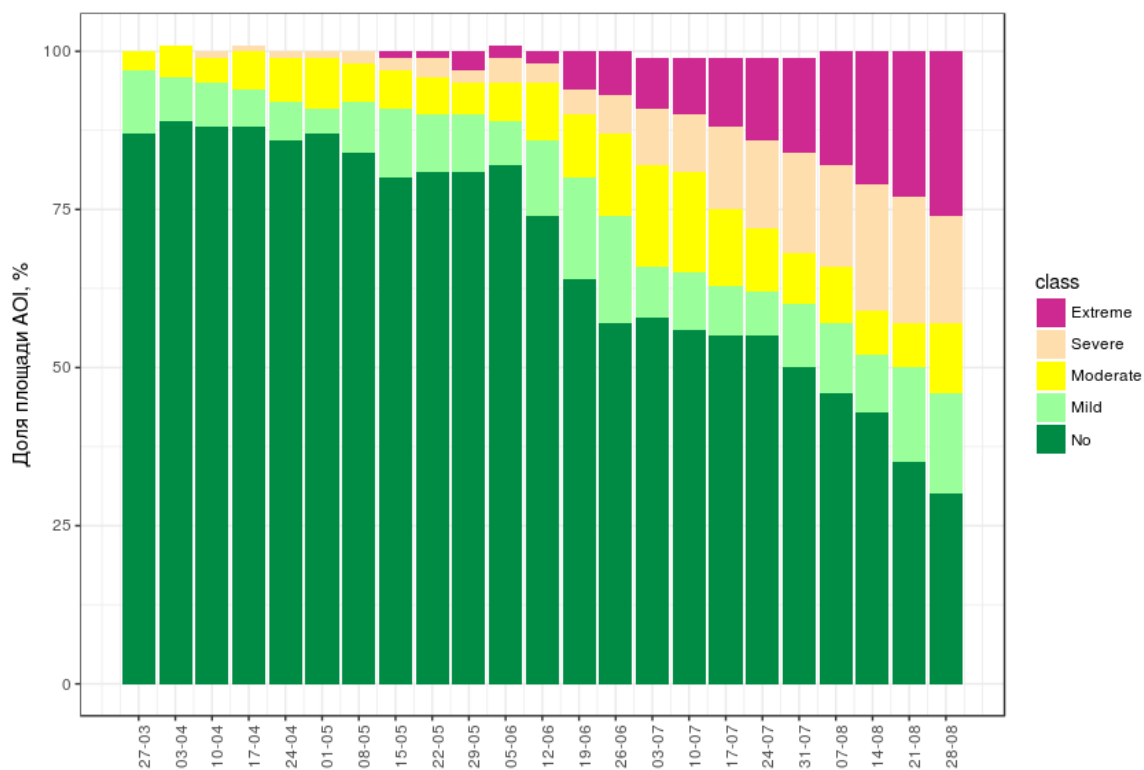


Рисунок 4.31 – Визначення долі прощі з показниками TCI за даними часового ряду 1.04.2017 - 01.08.2017 р. для Іванівського району Херсонської області

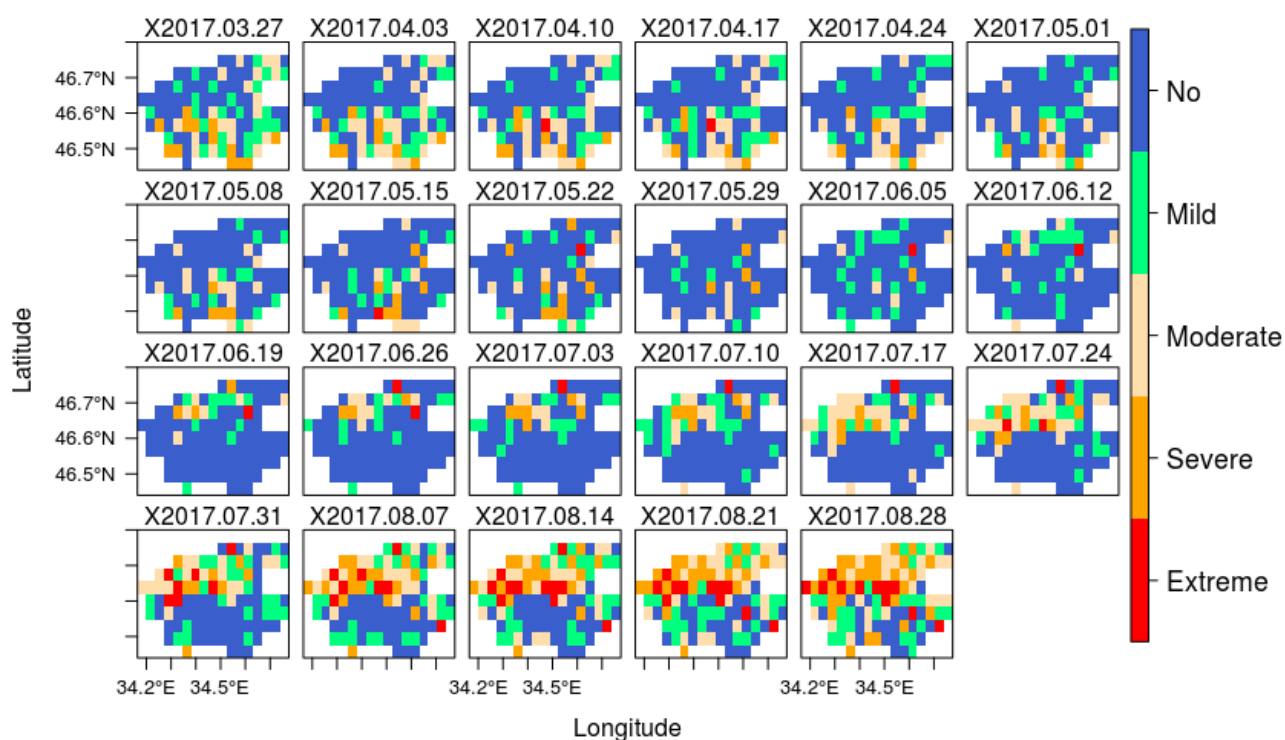


Рисунок 4.32 – Картограми VNI за даними часового ряду з 1.04.2017 - 01.08.2017 року для Іванівського району Херсонської області

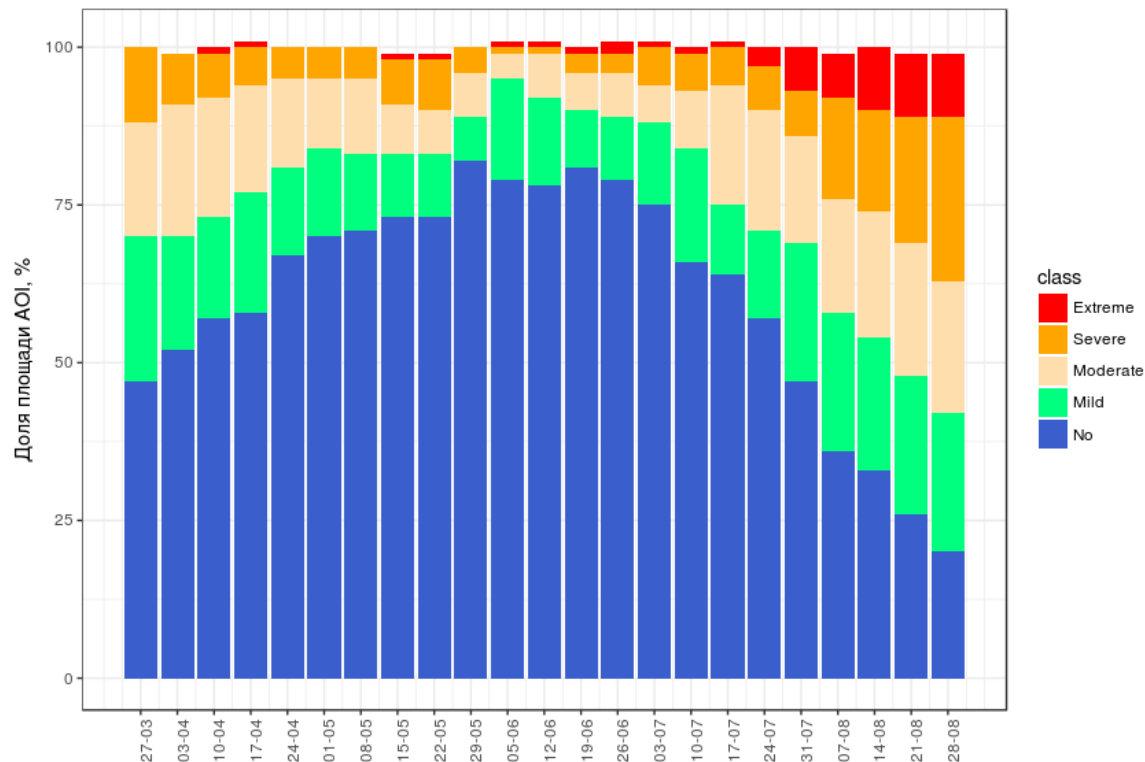


Рисунок 3.33 – Визначення долі проці з показниками TCI за даними часового ряду з 1.04.2017 - 01.08.2017 року для Іванівського району Херсонської області

4.4.2 Технологія моніторингу гідрологічних посух

Рішення проблеми раціонального використання і охорони водних ресурсів можливо тільки на основі комплексного системного підходу до вивчення просторово-часових закономірностей впливу природних і антропогенних факторів на якість і обсяг поверхневих вод з використанням супутникових та наземних даних. При вивченні водного режиму суші одним з важливих вхідних параметрів гідрологічних моделей є площа поверхні водойм. Регулярне отримання інформації про даний параметр за наземними даними є складним завданням і вимагає великого обсягу робіт. Використання супутникових даних дозволяє істотно спростити цю задачу і виконувати її з більшою оперативністю і періодичністю при менших витратах.

Для кількісної оцінки наслідків посухи 2013-2015р в Каліфорнії були обрані великі прісноводні водойми - озеро Оровіль і озеро Фолсом (Рис. 4.34). Джерелами інформації про стан даних водойм за вказаний період були багатоспектральні зображення середнього просторового розрізнення з супутника Landsat 8 (знімальний прилад OLI).

Методологія досліджень полягає у визначенні динаміки зміни площі водної поверхні озер Оровіль і Фолсом використовувався пошук і обробка знімків супутника Landsat 8, яка включала такі етапи:

- попередні операції (вибір області інтересу, пошук знімка за датою);
- спектральний синтез в натуральних і в штучних кольорах;
- створення індексних зображень NDWI і MNDWI;
- порогову бінаризація індексного зображення;
- морфологічну фільтрацію бінарного зображення;
- векторизацію бінарного зображення і розрахунок площі водної поверхні;
- візуалізацію змін на цифровій карті і експорт векторного шару в kml-файл.

Моніторинг гідрологічних посух ґрунтується на індексах NDWI (Normalized Difference Water Index) і MNDWI (Modified NDWI), які дозволяють виділити на

супутниковому зображенні водні об'єкти по спектральним каналах ближнього ІК (NIR), короткохвильового ІК (SWIR) і видимого (Green) діапазонів.

На Рис. 4.34 показано результати основних етапів обробки зображення озера Оровіль від 3 червня 2013 р. зі супутника Landsat 8.

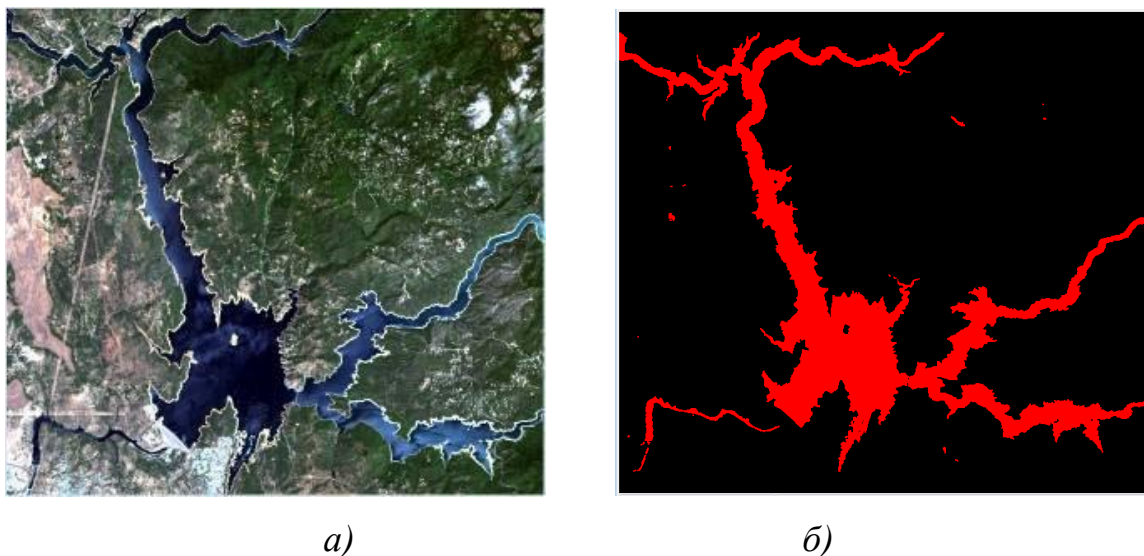


Рисунок 4.34 – Результати обробки зображення озера Оровіль від 3 червня 2013 р: *а)* синтез каналів RGB; *б)* результат векторизації, площа водної поверхні 4740 га

На Рис. 4.35 показані результати основних етапів обробки супутникового зображення озера Оровіль від 12 серпня 2015 р. зі супутника Landsat 8. На Рис. 4.36 показані зображення озера Оровіль між 3 червня 2013 р. і 12 серпня 2015 р. за даними супутника Landsat 8. Зменшення площі водної поверхні склало 2112 га.

Наведені вище катастрофічні наслідки багаторічної посухи спостерігалися практично на всій ділянці берегової лінії озера Оровіль. Завдяки широкій смузі захоплення знімального приладу OLI супутника Landsat 8 був проведений аналогічний моніторинг змін для озера Фолсом по тим же знімкам. На Рис. 4.37 показані результати основних етапів обробки зображення озера Фолсом від 3 червня 2013 р зі супутника Landsat 8.

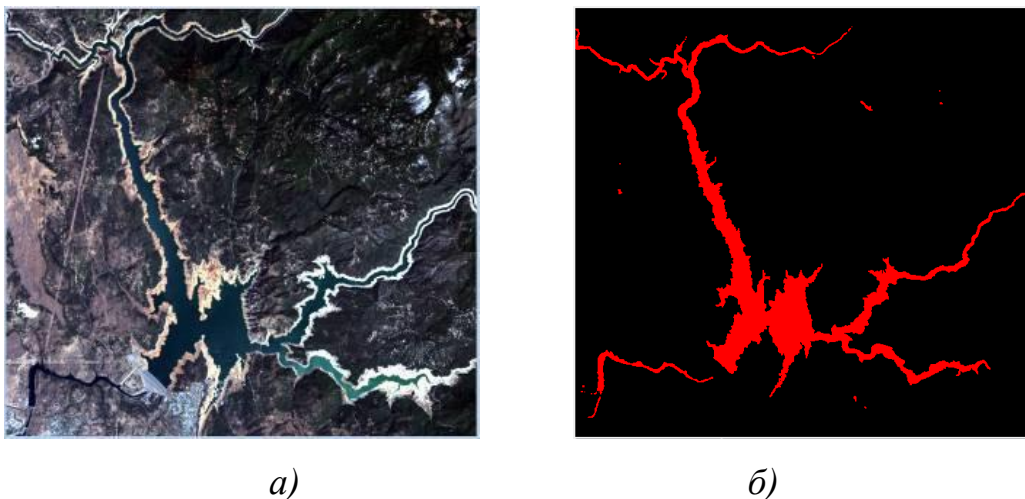


Рисунок 4. 35 – Результати обробки зображення озера Оровіль від 12 серпня 2013р: *а)* синтез каналів RGB; *б)* результат векторизації, площа водної поверхні 2628 га

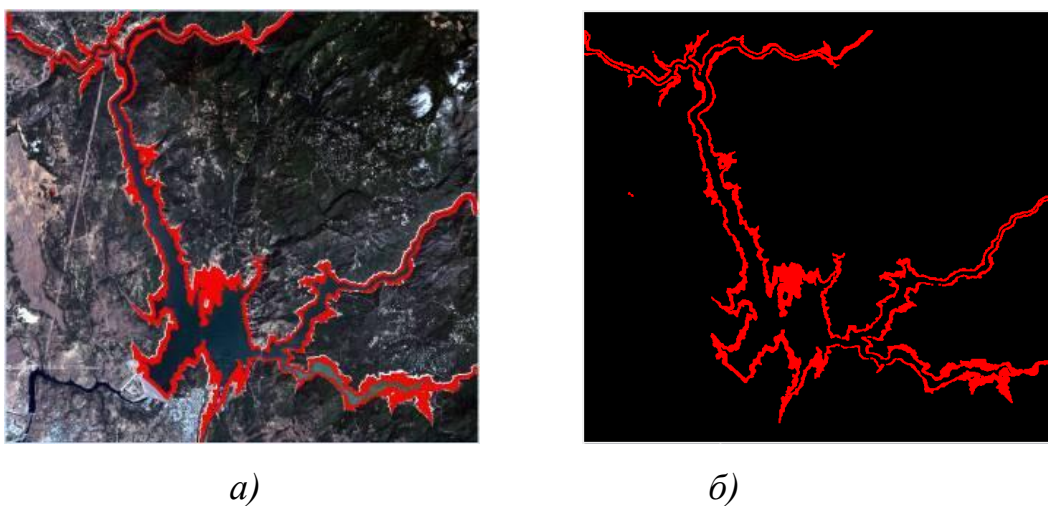


Рисунок 4.36 – Зміни озера Оровіль між 3 червня 2013р і 12 серпня 2015р: *а)* результат векторизації, площа водної поверхні 4740 га; *б)* результат векторизації, зменшення площі водної поверхні на 2112 га

На Рис. 4.38 показані результати основних етапів обробки зображення озера Фолсом від 12 серпня 2015 р. зі супутника Landsat 8. На Рис. 3.38 показані зміни озера Фолсом між 3 червня 2013 р. і 12 серпня 2015 р. за даними супутника Landsat 8, зменшення площі водної поверхні склало 1840 га.

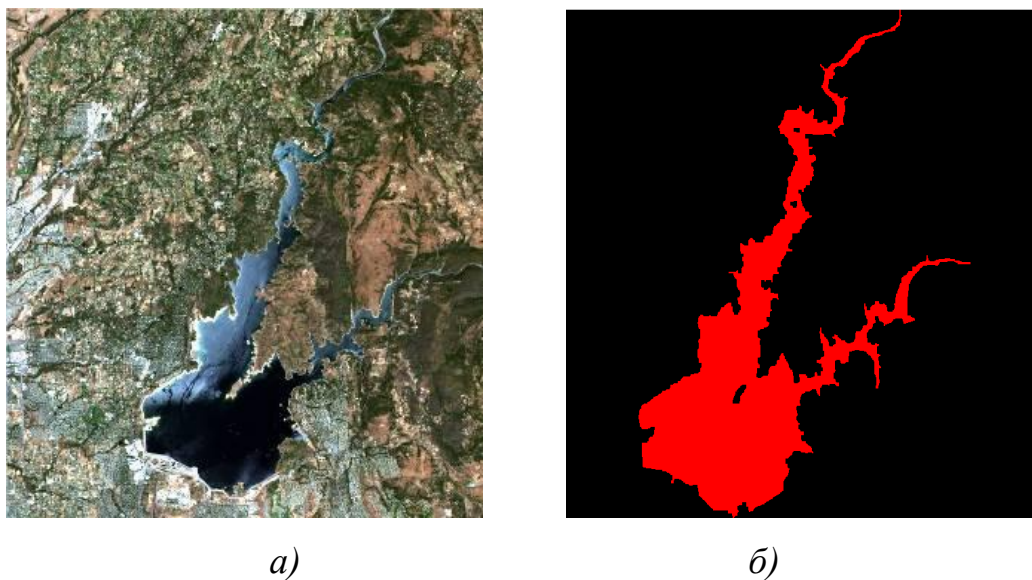


Рисунок 4.37 – Результати обробки зображення озера Фолсом від 3 червня 2013р: *а)* синтез каналів RGB;
б) результат векторизації, площа водної поверхні 3850 га

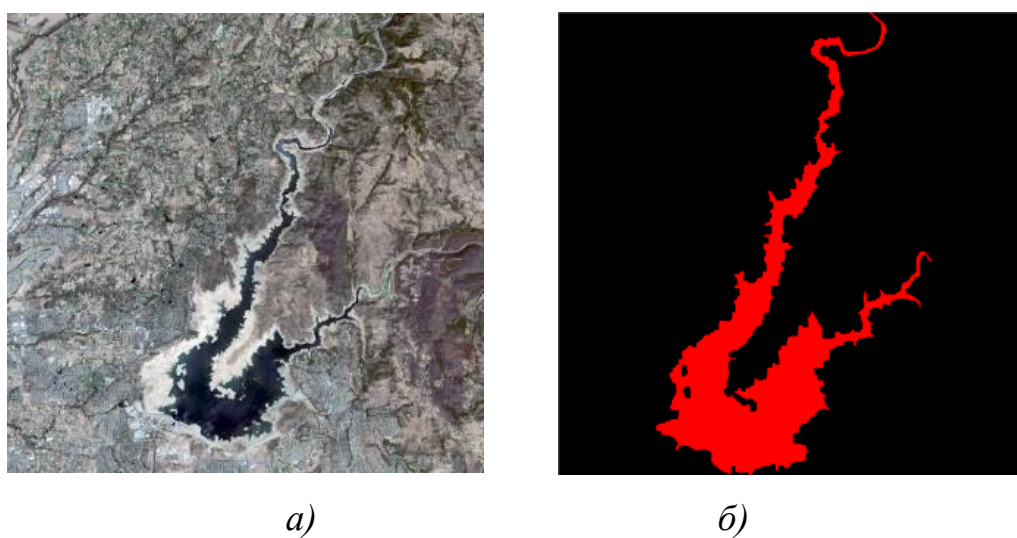


Рисунок 4.38 – Результати обробки зображення озера Фолсом від 12 серпня 2015 р:
а) синтез каналів RGB;
б) результат векторизації, площа водної поверхні 2010 га

Масштабні наслідки посухи, показані на прикладі озер Оровіль і Фолсом, характерні і для інших великих прісноводних водойм Каліфорнії, велика частина з яких має статус водосховищ, а також для водойм в інших штатах США. Наприклад, озеро Мід, що забезпечує водою Лас Вегас на 90%, містить на 145 футів води

менше, ніж зазвичай. Очікується, що озеро обміліє ще на 20 футів до червня 2016 року. Мова йде не тільки про воду, а про забезпеченні електрикою - греблі ГЕС майже пересохнули.

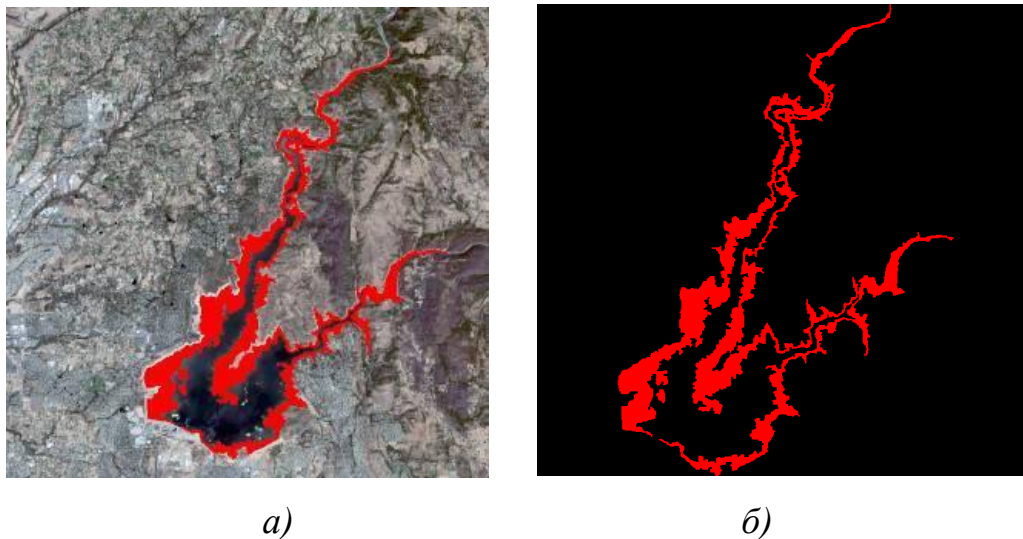


Рисунок 4.39 – Зміни озера Фолсом між 3 червня 2013р і 12 серпня 2015р:

а) результат векторизації, від 3 червня 2015 р.;

б) результат векторизації, від 12 серпня 2015 р., зменшення площі водної поверхні на 1840 га

Розроблену технологію моніторингу гідрологічних посух інтегровано до інформаційної системи хмарного сервісу дозволяє побудувати векторні карти змін водної поверхні.

4.5 Моніторинг агротехнічних операцій на основі інтерферометричного аналізу радарних даних

Для моніторингу збиральних робіт широко використовується спостереження за сільськогосподарською технікою наземним, повітряним (UAV) і супутниковим способами (GPS) [36, 51]. Установка різних датчиків дає можливість контролювати практично будь-які параметри техніки в режимі реального часу. Обов'язковим компонентом таких систем моніторингу є геоінформаційна система (ГІС), що дозволяє відстежувати роботу техніки в межах полів. Недоліком такого підходу є

висока вартість, пов'язана з необхідністю установки датчиків, прийому і обробки даних від датчиків, а також розробки і підтримки спеціальної ГІС.

Незамінним інструментом при моніторингу великих площ посівів є супутникові дані дистанційного зондування. Особливо вигідно в зв'язку з цим використання супутникових даних, що знаходяться у вільному доступі. Для реалізації моніторингу необхідно покриття досліджуваної області супутниковими даними, що дозволяють надійно фіксувати факт проведення збиральних робіт.

Аналіз можливостей моніторингу збирання за даними оптичних сенсорів [52] показав, що після збирання утворюється смугаста текстура поля з характерним просторовим масштабом, відповідним ширині жнивarki комбайна (зазвичай 6-9 м). Такі текстури добре фіксуються на зображеннях високого просторового розрізнення (до 10 м.). Після збирання соломи на полі сільськогосподарська техніка формує іншу текстуру, пов'язану з системою копиць, або слідами їх збору і вивозу. Просторовий масштаб текстури визначається відстанню між рядами копиць. Текстури, пов'язані зі збором соломи цілком помітні на знімках середнього просторового розрізнення (30 м). На знімках низького просторового розрізнення, таких як дані MODIS, обидва види текстур не реєструються.

Супутникові дані низького розрізнення здатні реєструвати зміни усереднених значень коефіцієнтів відображень поля або вегетаційних індексів. Збирання культури може змінювати ці значення як в сторону збільшення, так і в бік зменшення [52]. Кількісні характеристики змін залежать від обсягу рослинної біомаси до збирання, способу збирання і марки комбайна. В результаті часові ряди даних оптичних сенсорів низького розрізнення, зокрема MODIS, не дозволяють визначати дати проведення збиральних робіт.

Існує велика кількість робіт [53], присвячених визначення дат зміни фенологічних фаз за допомогою часових рядів даних оптичних сенсорів. Фіксуючи момент кінця сезону вегетації (EOS, the end of the growing season), пов'язаний з фазою дозрівання рослин, дозволяє спрогнозувати терміни проведення збирання. Однак такий підхід не дозволяє встановити факт виконання збирання врожаю сільськогосподарської культури.

Таким чином, для виявлення прибраних полів бажано використовувати оптичні дані середнього і високого просторового розрізнення (5-10 м). Моніторинг збирання за такими зображеннями стикається з традиційною для оптичних сенсорів проблемою хмарності. Можливість спостереження незалежно від хмарності надають радарні дані.

4.5.1 Особливості обробки радарних даних

Космічна радарна зйомка дає цінну інформацію про стан земної поверхні і, зокрема, рослинного покриву. Основною перевагою радарних даних в порівнянні з даними оптичних сенсорів є незалежність від хмарності і освітленості досліджуваної поверхні. Однак на шляху до використання цих даних існує ряд проблем. Комплексне взаємодія радарного сигналу з підстильної поверхнею призводить до того, що на розсіювання сигналу впливає стан рослинного покриву і ґрунту, а також рельєф місцевості [47, 126]. Крім того, розсіювання сигналу залежить від кута падіння променя радара на підстилаючої поверхню.

У більшості публікацій, присвячених моніторингу рослинного покриву за допомогою радарів, взаємодія сигналу з поверхнею характеризується коефіцієнтом зворотного розсіювання σ^0 [82, 85]. Інтерпретація часових рядів σ^0 з точки зору подій, що відбуваються на полі, дає неоднозначні результати: збільшення σ^0 може бути викликано зростанням рослин, опадами або обробітком ґрунту. Для вирішення цієї неоднозначності потрібно залучати додаткові дані, наприклад, дані про опади.

Доповнити інформацію, отриману з σ^0 , дозволяє когерентність [83]. Когерентність - це модуль комплексного коефіцієнта кореляції між двома знімками, що містять інформацію про амплітуду і фазі радарного сигналу (Single Look Complex, SLC). Когерентність буде висока, коли два інтерферируючих зображення відображають однакове або майже однакове взаємодія з розсіює поверхнею. Зміна σ^0 при високій когерентності знімків свідчить про зміну діелектричної проникності поверхні при незмінній конфігурації розсіювачів на полі [83] (наприклад, про збільшення вологості ґрунту внаслідок опадів). З іншого боку, стабільні значення σ^0 ,

що супроводжуються низькою когерентністю, свідчать про зміну конфігурації розсіювачів. Це може статися в результаті оранки або збирання поля - сільськогосподарських операцій, що змінюють стан верхнього шару ґрунту або рослинного покриву, але мало впливають на діелектричні характеристики ґрунту.

Спільному використанню σ^0 і когерентності для моніторингу рослинного покриву присвячено порівняно невелике число публікацій [26, 83, 83, 128]. В [128] визначатиме прибраних полів чаю із застосуванням когерентності. В [26] показано можливість виявити дати сівби і збирання за допомогою часових рядів σ^0 і когерентності. Справжня робота є розвитком результатів цих робіт.

Ідея методу фіксації моменту закінчення збиральних робіт ґрунтується на властивостях когерентності радарних знімків. Періоди, коли ділянки покритою густою рослинністю або на них виконуються збиральні роботи, характеризуються низькою когерентністю. Навпаки, приbrane поле можна розглядати як ділянку відкритої землі, так і розріджена рослинності, для яких характерна висока когерентність. Таким чином, закінчення збиральних робіт на полі супроводжується стрибкоподібним збільшенням когерентності. Цей момент і пропонується відстежувати.

АОІ. Для перевірки якості роботи алгоритму була складена вибірка з 77 ділянок, розташованих на території Акмолинської і Костанайської областей республіки Казахстан (Рис. 4.40). Дати збирання ділянок визначені візуальним дешифруванням зображень із супутників Sentinel-2 і Landsat-8, отриманих з сервісу LandViewer [16].

Супутникові дані. Зображення Sentinel-1B SLC IW (відносна орбіта 20, slice 4, swath IW2). Дати зйомки: 2018-05-01 - 2018-10-28, кожні 12 діб (знімок 2018-08-05 відсутня). Джерело зображень: Copernicus Open Access Hub [63].

Збирання виконується в генеративний період розвитку рослин. Відстежити цей період можна по зниженню NDVI на поле до певного рівня в порівнянні з максимальними сезонними значеннями, досягнутими в розпал вегетації рослин. Часові ряди NDVI були побудовані на основі 8-денних композитів MOD09Q1 [129]. Використовувалися зображення за період 2018-04-07 - 2018-11-01.

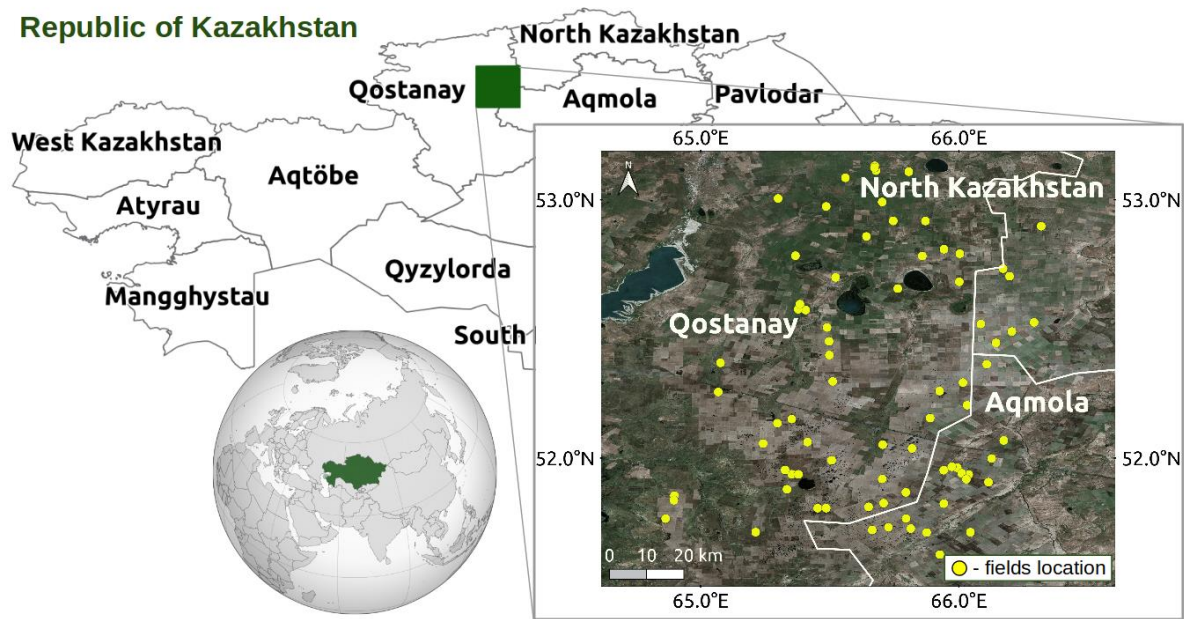


Рисунок 4.40 – Розташування АОІ

Для оцінки змін σ^0 під впливом опадів, що випали використовувалися дані GPM IMERG Late з 30-хвилинним періодом накопичення опадів [130]. Інтервал спостережень: 2018-04-27 - 2018-11-01. Використовувалися дані по опадам, що випали в рідкій і змішаній фазах (liquid).

Обробка супутникових даних σ_0 і когерентність обчислювалися в ПЗ ESA Sentinel Application Platform (SNAP) [131]. Для автоматизації розрахунків застосовувалися GPT і bash скрипти (Рис. 4.41) інтегровані у інформаційну систему хмарних обчислювань.

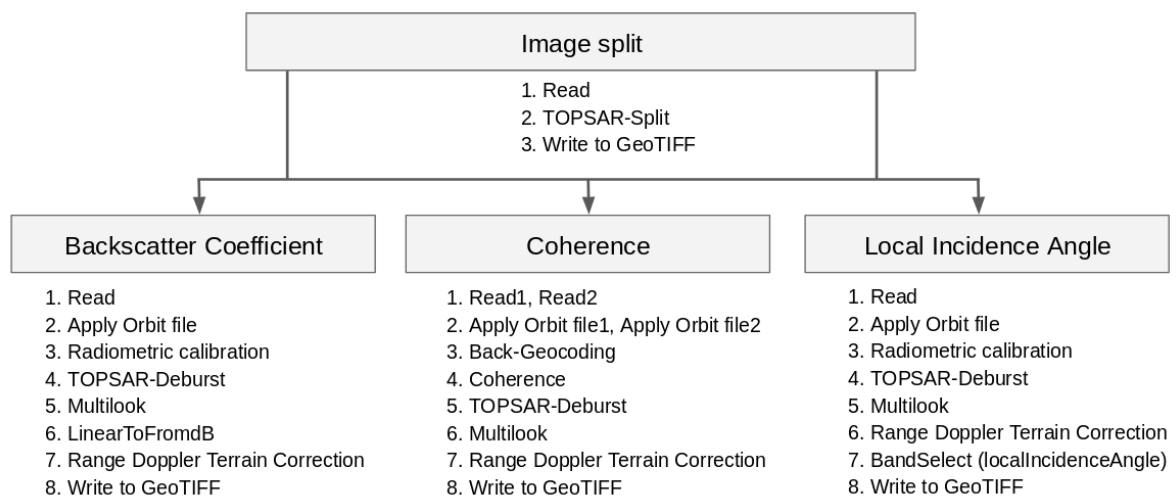


Рисунок 4.41 – Схема обробки радарних знімків Sentinel-1

Скачування та обробка даних MOD09Q1 відбувалась засобами бібліотеки MODISrsp [132] в пакеті R [133]. Будувалися часові ряди середнього по ділянці NDVI і згладжувалися за допомогою сплайн-інтерполяції (функція `smooth.spline`).

Якщо за даними GPM IMERG Late за 12 год. До зйомки випало понад 2 мм опадів, значення σ^0 відповідної дати відзначалися як сумнівні (час зйомки визначався з метаданих радарних знімків) і замінювалися за допомогою лінійної інтерполяції.

Характерною особливістю спостережуваних ділянок на території Республіки Казахстан є їх неоднорідність, викликана ерозією ґрунту, присутністю фрагментів пара і поклади, наявністю бур'янів, а також неточностей у вказівці меж (Рис. 4.42, 4.43). Для зменшення впливу міжрядь і неточностей кордонів, навколо ділянки будувався внутрішній буфер шириною 15 м. Щоб отримати однорідні фрагменти, усередині ділянки випадковим чином (функція `spsample` пакета `sp`, опція "stratified") вибиралися контрольні точки навколо яких будувалися буфери радіусом 100 м . Таких точок на ділянці вибиралося не менше 30.

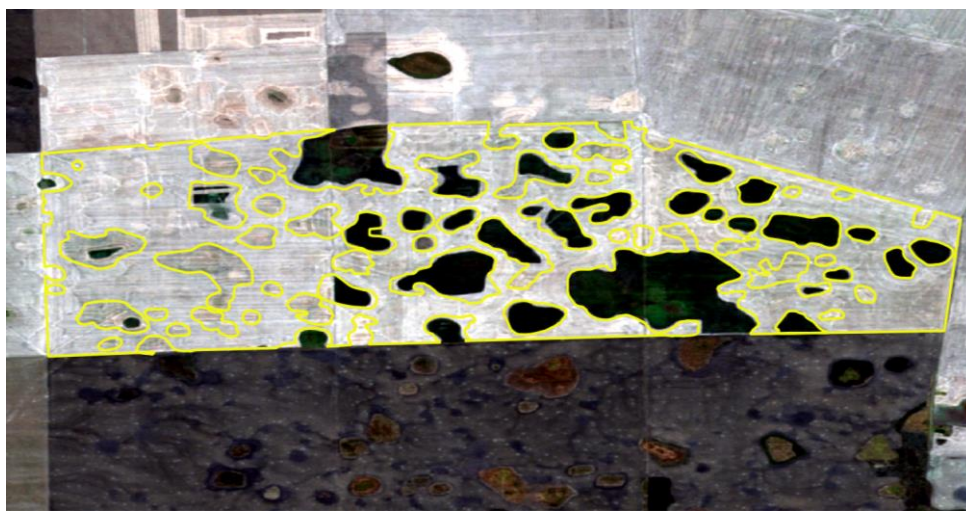


Рисунок 4.42 – Супутникове зображення Sentinel-2, дата зйомки 26.09.2019 (ID 29600)

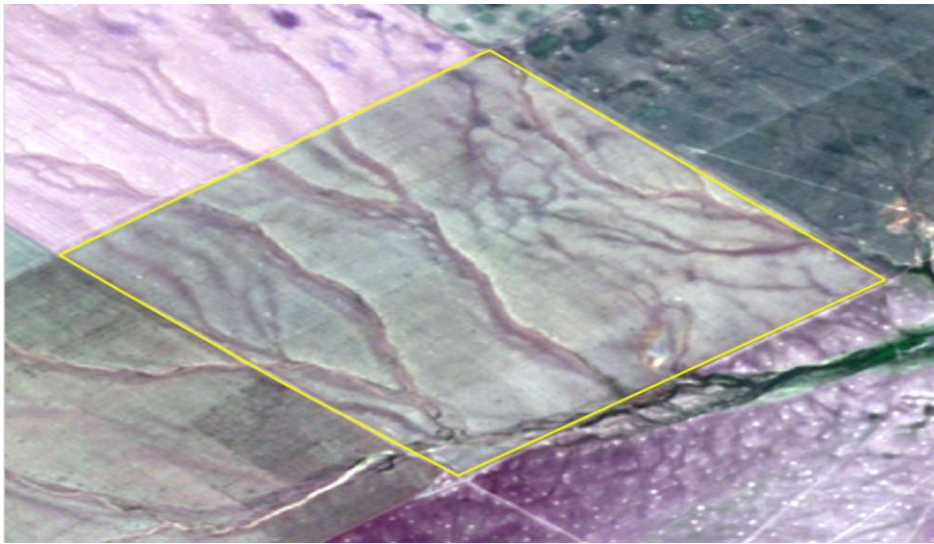


Рисунок 4.43 – Супутникове зображення Sentinel-2, дата зйомки 13.09.2018 (ID 9207)

На розглянутих ділянках переважають ярові зернові культури, в першу чергу пшениця. Для визначення терміну початку моніторингу фіксувалася дата максимуму NDVI, яка приблизно відповідає періоду колосіння / цвітіння рослин. Тривалість цієї фази становить 7-10 днів, після чого починається дозрівання зерна. З урахуванням оцінок початку періоду дозрівання, отриманих за NDVI, збір радарних даних було розпочато 1 серпня, з таким розрахунком щоб до початку збирання отримати щонайменше дві карти когерентності. Збиральна кампанія 2018 р. в даному регіоні стартувала на початку вересня.

4.5.2 Опис методу

Для спостереження за збиранням використовувалися часові ряди σ^0 в VH-поляризації (σ^0 VH), так як відомо про високу кореляцію між розсіюванням в крос-поляризації і показниками стану рослин, такі як LAI. Карти когерентності будувалися для VV-поляризації (cVV), оскільки когерентність в VH-поляризації показала себе менш чутливою до змін, що відбуваються на полі.

Для кожної контрольної точки будувалися часові ряди усереднених значень σ^0 VH і cVV.

Етапи алгоритму наведені на Рис. 4.44.

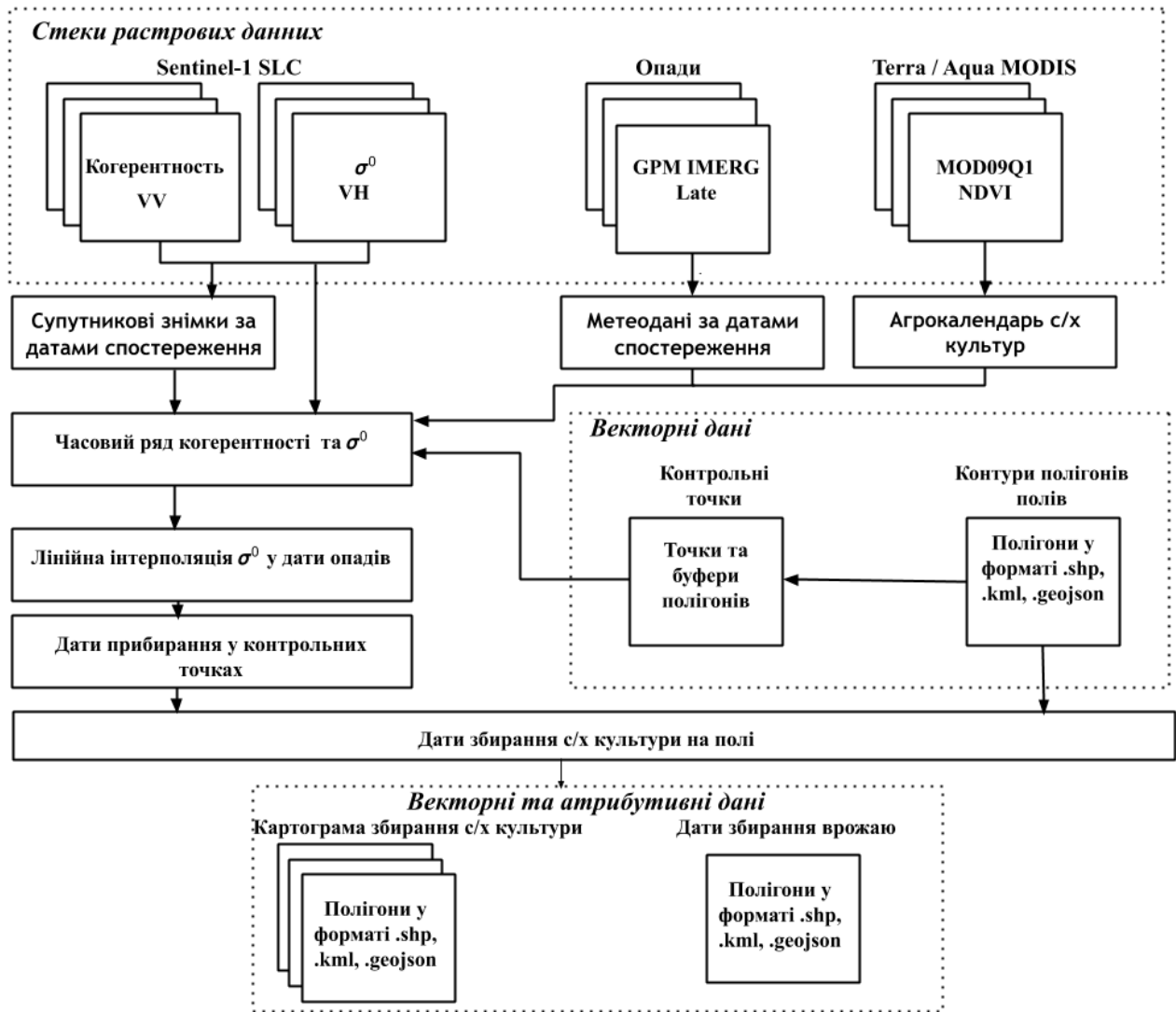


Рисунок 4.44 - Блок-схема етапів алгоритму визначення дати збирання ділянки

Ключовим етапом алгоритму є визначення дати закінчення збирання для контрольної точки (етап 3). Етапи 1 і 4 відносяться до конкретної реалізації алгоритму для території північного Казахстану. Оцінки, проведені для України, показали що на однорідних ділянках вибір контрольних точок не потрібен і можна обмежитися середніми по ділянці значеннями σ^0 і когерентності. Етап 2 дозволяє більш точно визначити момент початку спостережень, що дає можливість заощадити обчислювальні ресурси, проте не є необхідним.

Визначення дати збирання контрольної точки складається з:

- фіксації дат закінчення збирання щодо змін когерентності;

- фільтрації помилкових спрацьовувань по граничним значенням σ_0 .

Розглянемо як відбувається пошук дат закінчення збиральних робіт щодо змін в часі ряду когерентності.

Спостереження показали, що часовий ряд когерентності в період дозрівання поводить одним із таких способів:

Когерентність поступово зростає в міру дозрівання і висихання рослин. Потім когерентність падає, як правило, в період проведення збиральних робіт. Після цього когерентність знову зростає (Рис. 4.45, а). Така поведінка, зокрема, зустрічається у просапних культур.

Когерентність залишається практично незмінною і низькою, а потім стрибкоподібно зростає (Рис. 4.45, б). Подальше зростання когерентності пов'язаний із закінченням збиральних робіт.

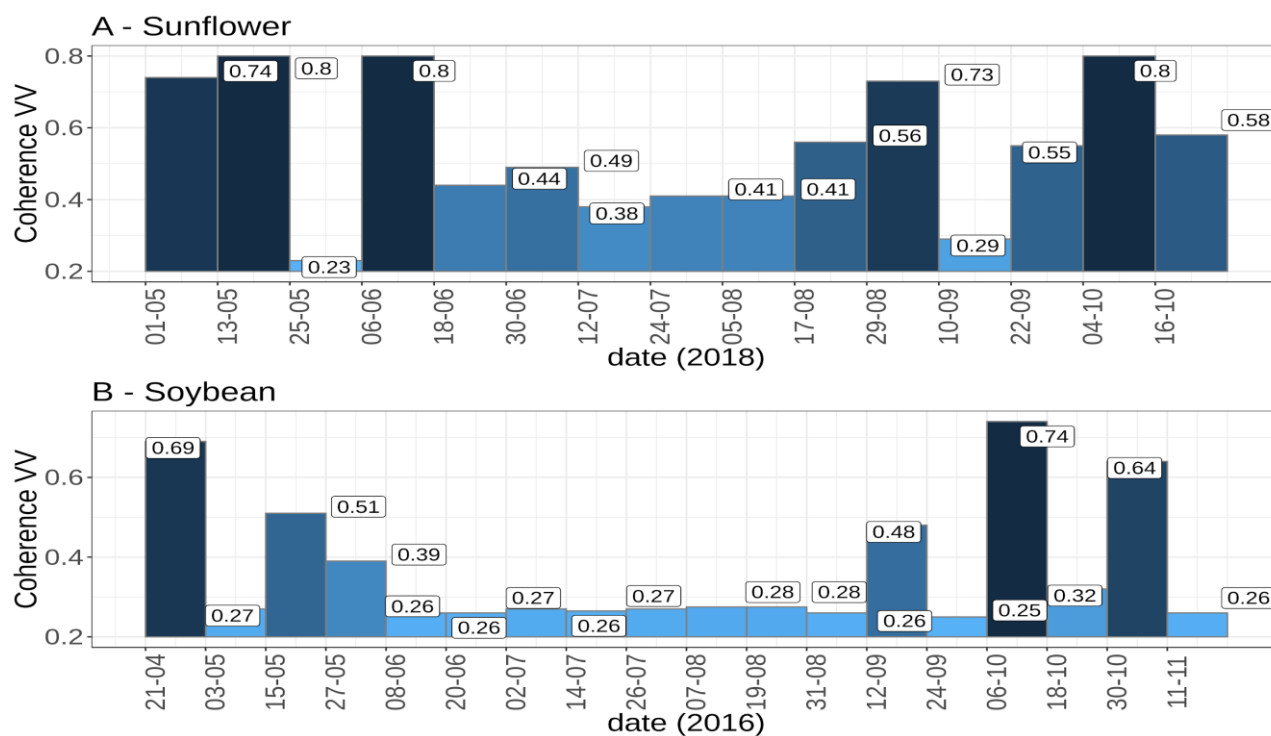


Рисунок 4.45 – Приклади часових рядів когерентності VV для сільськогосподарських ділянок:

а) соняшник (Україна), період збирання: 10.09.2018-22.09.2018;

б) соя (Україна), період збирання: 31.08.2016-12.09.2016

Нехай C_i - i -я карта когерентності, n - загальне число таких карт. Обчислимо різниці когерентного ΔC_i і визначимо тенденції їх зміни DC_i . Виберемо поріг ϵ , такий що при зміні C_i в діапазоні $[-\epsilon; \epsilon]$ когерентність вважається постійною ($DC_i = 0$).

$$\begin{aligned}\Delta C_i &= C_{i+1} - C_i, \quad i = 1, \dots, n-1, \\ \Delta^2 C_i &= \Delta C_{i+1} - \Delta C_i. \\ DC_i &= \begin{cases} 0, & |\Delta C_i| \leq \epsilon, \\ 1, & \Delta C_i > \epsilon \\ -1, & \Delta C_i < -\epsilon \end{cases} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Періоду збиральних робіт відповідає падіння когерентності ($DC_i = -1$), або незмінна когерентність ($DC_i = 0$) в порівнянні з попереднім періодом. Після закінчення збирання когерентність повинна зростати ($DC_i = 1$). Таким чином, збирання відповідають переходи $DC_i \rightarrow DC_{i+1} : 0 \rightarrow 1$ або $-1 \rightarrow 1$. Вводячи другі різниці $D^2 C_i = DC_{i+1} - DC_i$, запишемо умови для змін когерентності, відповідних проведення збирання.

$$\begin{aligned}D^2 C_i &= 1 \& DC_{i+1} = 1 \\ D^2 C_i &= 2 \end{aligned} \quad (4.11)$$

Зауважимо, що перехід $DC_i \rightarrow DC_i + 1$ від -1 до 0 також дає $D^2 C_i = 1$. Цей момент в ряді випадків може бути пов'язаний з початком збиральних робіт, але не є їх закінченням. Тому вводиться додаткова перевірка: друга дата в переході $DC_i \rightarrow DC_{i+1}$ повинна задовольняти умові $DC_{i+1} = 1$.

Після перевірки умов (4.10) кожній контрольній точці зіставляється одна або кілька можливих дат збирання. Наступним кроком є перевірка цих дат по граничним значенням σ^0 - порогу густій рослинності (svh_th1) і порогу відкритої землі (svh_th2). Якщо на перевіряється дату в даній контрольній точці залишилася досить густа рослинність ($\sigma^0 > svh_th1$), значить даний стрибок когерентності не рахується пов'язаним зі збиранням. Така дата виключається зі списку можливих дат збирання.

Якщо ж на задану дату поле прибрано до стану відкритої землі ($\sigma^0 < \text{svh_th2}$), то перевіряти наступні дати не має сенсу.

Найбільш рання з дат, що залишилися в списку після перевірки, приймається за дату закінчення збирання в даній контрольній точці. Пізніші дати можуть бути пов'язані з післязбиральної роботами, зокрема, з дискуванням.

Висновок про дату збирання всієї ділянки приймається по досягненню певного порогу від числа прибраних контрольних точок. Наприклад, якщо 70% точок прибрані до заданої дати, значить ділянку прибраний. Таким чином, останнім параметром алгоритму є `field_harvested_th` - частка контрольних точок, які отримали дати збирання, достатня щоб ділянка вважався прибраним.

Розрахунок термінів закінчення збирання проведено при наступних параметрах алгоритму: `eps` = 0.03, `svh_th1` = -21 дБ, `svh_th2` = -25 дБ, `field_harvested_th` = 70%. Початок моніторингу: 2018-08-01, закінчення моніторингу: 2018-11-01. Похибки визначення дат збирання склали: Mean absolute error (MAE) = 6.5 днів, Root Mean Square Error (RMSE) = 8.0 днів.

Картограми збирання ділянок показані на Рис. 4.46.

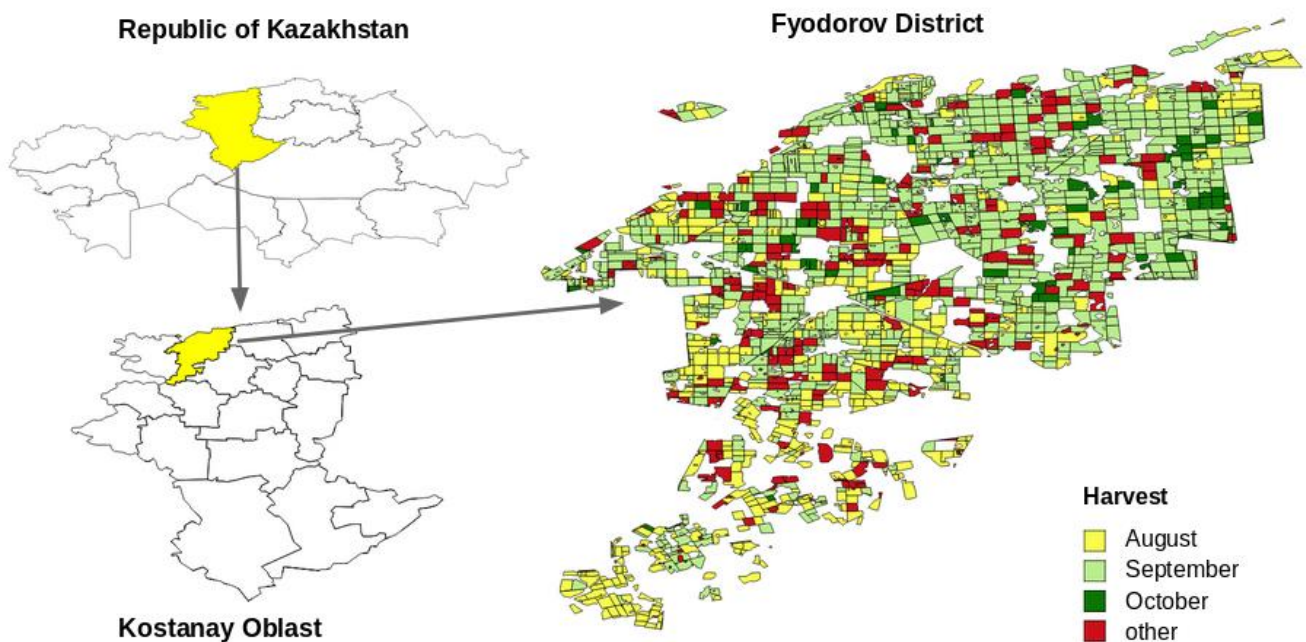


Рисунок 4.46 - Картограма збирання ділянок Федорівського району Костанайської області (Республіка Казахстан), 2018 р.

Основним фактором, що впливає на точність визначення терміну закінчення збирання, є періодичність зйомки супутниками Sentinel-1. В даний час період між зйомками становить 12 діб (AOI повністю покривається даними з супутника Sentinel-1B). Підвищити точність можна за рахунок скорочення проміжку часу між зйомками з 12 до 6 діб при використанні даних обох супутників Sentinel-1, проте в даному регіоні, судячи з архівними даними і планам зйомки, це малоймовірно.

Пропуски окремих зображень і періодичні планові пропуски цілих відносних орбіт представляють собою проблему для моніторингу. Пропуск одного зображення в часовому ряді в період дозрівання може істотно знизити точність визначення терміну закінчення збирання. Виникає проблема інтерполяції пропущених значень. Так, лінійна інтерполяція когерентності призводить до пропусків стрибків когерентності, тоді як ступінчаста інтерполяція викликає помилкові спрацьовування алгоритму. Для заповнення пропущених значень когерентності 2018-08-05 застосовувалася ступінчаста інтерполяція. Помилкові спрацьовування віддалялися за допомогою перевірки по порогу σ^0 . Для заповнення пропусків σ^0 застосовувалася лінійна інтерполяція.

Слід зазначити, що строки збирання для контрольних полів отримані візуальним дешифруванням, і тому можуть відрізнятися від реальної дати збирання на 1-3 доби, що пов'язано з періодичністю зйомки супутників Sentinel-2A, B і Landsat-8, а також присутністю хмарності.

Агротехнічні роботи, що призводять до зміни верхнього шару ґрунту, виконані невдовзі після збирання, фіксуються алгоритмом як частина збиральних робіт. Так, якщо на наступний 12-добовий інтервал після проведення збирання виконується дискування, то дата закінчення збирання фіксується за датою дискування. Збільшення частоти зйомки допомогло б вирішити цю проблему.

З урахуванням висловлених міркувань, отриману точність визначення дати збирання можна вважати задовільною.

Скачки збільшення когерентності можуть відбуватися до проведення збиральних робіт. Імовірно, вони пов'язані з різким підсиханням рослин і

скороченням листкової поверхні. Помилкові спрацьовування алгоритму в таких випадках запобігають перевіркою значень $\sigma^0(\text{svh_th1})$.

Іноді закінчення збиральних робіт супроводжувалося незначним збільшенням когерентності. Ці випадки ставилися до полів, дати збирання яких повинні були бути зафіксовані алгоритмом 2018-09-22. Можливою причиною цього є сильний дощ, що спостерігався за даними GPM IMERG в той день незадовго до зйомки. Імовірно, дощ викликав зниження когерентності, що не дозволило зафіксувати її стрибок, що очікувався після закінчення збирання. Про вплив дощів на величину σ_0 добре відомо [6], однак їх вплив на когерентність виражено не так явно. Зазначений випадок потребує додаткового дослідження.

4.6 Висновки до четвертого розділу

1. В даному розділі запропоновано методи розв'язання прикладних задач на основі методів попередньої обробки із розділу 2 та технології хмарної обробки даних та сервісу LandViewer із розділу 3. А саме, запропоновано метод супутникового моніторингу наслідків незаконного видобутку бурштину, інформаційну технологію моніторингу вирубки лісів, ефективну технологію автоматизованого визначення площ територій, які постраждали від лісових пожеж, моніторингу посух та моніторингу агротехнічних операцій.
2. На відміну від відомих методів визначення площ вигорілих територій по різночасним супутниковим знімкам з використанням диференційованого нормалізованого індексу гару ($dNBR$), запропонована технологія дозволяє більш точно визначати вигорілі ділянки завдяки незалежному визначенню оптимальних порогів бінаризації для кожного знімка. Крім того, запропонований воркфлоу дозволяє аналізувати часові зміни на постраждалих ділянках лісу для тривалих періодів спостереження, використовуючи створені векторні шари з атрибутивною інформацією.

Дана технологія дозволяє реалізувати всі процедури обробки у вигляді Web-сервісу, що надає актуальні і достовірні дані про наслідки пожеж.

3. Запропоновано метод визначення термінів закінчення збиральних робіт на основі радарних даних і методів інтерферометрії. Алгоритм фіксує стрибкоподібне зростання когерентності, що виникає після закінчення збирання, і пов'язаний з перетворенням поля в ділянку відкритої землі. Метод адаптований для моніторингу неоднорідних полів (зі слідами ерозії, фрагментами перелогових земель). Помилки у визначенні дати закінчення збирання складають: $MAE = 6.5$ діб, $RMSE = 8.0$ доби. Пропуски знімків в часі ряду даних Sentinel-1 SLC IW, що припадають на період дозрівання, знижують точність визначення терміну закінчення збирання. Підвищити точність можна за рахунок скорочення проміжку часу між зйомками з 12 до 6 діб при використанні даних обох супутників Sentinel-1.

Результати даного розділу опубліковано в роботах [1-2, 4-6, 11, 15, 17, 18, 26, 28].

ВИСНОВКИ

В дисертаційному дослідженні розв'язана важлива науково-прикладна задача розробки нових методів і автоматизованих інформаційних технологій і систем попередньої і тематичної обробки різнорідних супутникових даних на базі хмарної архітектури, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс).

1. Проаналізовано сучасний стан розвитку методів та технологій аналізу супутникових даних, обґрунтовано необхідність розробки методів підвищення інформативності зображень на основі злиття різнорідних даних та ефективних робастних автоматизованих хмарних технологій обробки супутникових даних в реальному часі.

2. Удосконалено метод і розроблено автоматизовану інформаційну технологію (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних на основі злиття різночасових даних та продуктів їх обробки з різних джерел. На відміну від відомих алгоритмів, розроблений воркфлоу є робастним і забезпечує можливість розв'язання широкого класу прикладних задач на основі уніфікованих даних рівня L2, оскільки включає повний перелік можливих етапів попередньої обробки супутникових даних, включаючи видалення хмар і корекцію рельєфу, а також застосовний для всіх відомих на сьогодні супутників.

3. Удосконалено метод підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоканальних супутникових знімках на основі ІСА та вейвлет-перетворення та злиття з панхроматичним каналом. В роботі пропонується застосовувати вейвлет-перетворення (при цьому вирішується оптимізаційна задача знаходження коефіцієнтів лінійних форм суміщення) не до всього кольорового зображення, а лише до яскравісної компоненти після переведення первинного зображення до кольорового простору HSV, причому не за стандартними співвідношеннями. Це дозволило у порівнянні з існуючими підходами, підвищити просторове

розрізнення багатоканального зображення без спотворень кольору. Показано, що використання розробленого методу підвищує інформативність приблизно на 20%.

4. Отримала подальший розвиток методологія визначення ефективності методів обробки супутникових багатоканальних зображень. Розглянуто критерій визначення ефективності методу підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоспектральних зображеннях у вигляді ентропії яскравостей, який, крім власно оцінки, може використовуватися як ефективний інструмент керування при обробці цифрової інформації з метою оптимізації параметрів на різних етапах перетворення зображень, зокрема при вейвлет-декомпозиції.

5. Вперше розроблено інформаційну технологію зберігання та обробки супутникових даних, оптимізовану для використання в хмарному середовищі. Запропонована технологія забезпечує виконання задач супутникового моніторингу в реальному часі та їх масштабування на великі території без збільшення часу розв'язання задач.

6. Розроблені методи та інформаційні технології реалізовані у вигляді геопросторового Web-сервісу LandViewer, що ґрунтується на моделі обслуговування PaaS (платформа як сервіс). Web-сервіс розгорнутий в різних геолокаціях для максимальної швидкості передачі даних та відмовостійкості.

7. Удосконалено методологію розв'язання прикладних задач супутникового моніторингу на основі методів злиття різнорідних різночасових даних на базі хмарної платформи. Розроблено автоматизовані інформаційні технології моніторингу антропогенного впливу видобутку бурштину, моніторингу вирубок, оцінки збитків від лісових пожеж, моніторингу посух та виконання агротехнічних операцій.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Hnatushenko V.V., Hnatushenko Vik.V., Mozgovyi D.K., Vasyliiev V.V. Satellite technology of the forest fires effects monitoring. *Scientific bulletin of National Mining University. State Higher Educational Institution "National Mining University"*, Dnipropetrovsk, 2016. No 1 (151). P. 70-76.
2. Hnatushenko V.V., Vasyliiev V.V. Remote sensing image fusion using ICA and optimized wavelet transform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLI-B7, 2016, XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic. Pp.653-659.
3. Hnatushenko V.V., Mozgovyi D.K., Vasyliiev V.V., Kavats O.O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Scientific bulletin of National Mining University. State Higher Educational Institution «National Mining University»*. Dnipropetrovsk, 2017. No 2 (158). P. 99-105.
4. 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»*. Dnipropetrovsk, 2017. No 5 (161). C. 94-99.
5. Hnatushenko V.V., Garkusha I.N, Vasyliiev V.V. Creating soil moisture maps based on radar satellite imagery. *Proc. SPIE 10426, Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring*. 104260J (3 October 2017); Warsaw, Poland <http://dx.doi.org/10.1117/12.2278040>.
6. Hnatushenko V.V., Garkusha I.N, Vasyliiev V.V. Research of Influence of Atmosphere and Humidity on the Data of Radar Imaging by Sentinel-1. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Proceedings*. P.405-408.
7. Hnatushenko V.V., Garkusha I.N, Vasyliiev V.V. Using SENTINEL-1 data for monitoring of soil moisture. *2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. July 23–28, 2017. Fort Worth, Texas, USA. P.1656-1659. <http://ieeexplore.ieee.org/document/8127291>.

8. Mozgovyi D.K., Vasyliiev V.V., Hnatushenko V.V. Accuracy Evaluation of Automated Object Recognition Using Multispectral Aerial Images and Neural Network. *Proc. SPIE 10806, Tenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018)*, 108060H (9 August 2018); doi:10.1117/12.2502905.
9. Mozgovyi D.K., Vasyliiev V.V., Hnatushenko V.V. Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, IV-3, P.167-172, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-167-2018>.
10. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Medyanovskyi K., Vasiliev V., Bulanaya T., Gomilko I. Air Quality Monitoring in Urban Areas Using in-Situ and Satellite Data Within Era-Planet Project. *2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Spain, Valencia. P. 1668-1671.
11. 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 Projec. *ICDSIAI 2018: Recent Developments in Data Science and Intelligent Analysis of Information*. P. 146-155.
12. 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. *ICDSIAI 2018: Recent Developments in Data Science and Intelligent Analysis of Information*. P.134-145.
13. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., Vasiliev V. Land Cover and Land Use Monitoring Based on Satellite Data within World Bank Project. *Conference Proceedings of 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT 2019*. No 8770040, P. 127-130.
14. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Shumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Yailymova H. Cloud Approach to Automated Crop Classification Using Sentinel-1 Imagery. *IEEE Transactions on Big Data*. 1-1. 2019.
doi: 10.1109/TBDDATA.2019.2940237.

15. Мозговой Д.К., Васильев В.В. Анализ многолетней засухи по данным Landsat 8. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т. 24. Вип.19. С.79-89.
16. Мозговой Д.К., Васильев В.В. Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса Landsat Viewer. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т.24. Вип.19. С.95-101.
17. Мозговой Д.К., Васильев В.В. Оценка последствий лесных пожаров по данным ДЗЗ. *«Інформаційні системи, механіка та керування»*. 2016. №14. С.42-52
18. Мозговой Д.К., Васильев В.В. Мониторинг вырубок лесов по космоснимкам. *«Механіка гіроскопічних систем»*. 2016. №3. С. 75-86.
19. Mozgovoy D.K, Serikov I.Ju., Vasyliiev V.V., Hnatushenko V. V Automatic vegetation classification using multispectral aerial images and neural network. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»*. Дніпро. 2016. №6 (107). С.66-72.
20. Hnatushenko V.V., Polyakov M.V., Vasyliiev V.V. Urban change detection method of multi-temporal remote sensing images. *World Congress on GIS and Remote Sensing*. August 01-03, 2016. - New Orleans, USA. J Remote Sensing & GIS 2016, 5:3(Suppl) <http://dx.doi.org/10.4172/2469-4134.C1.003>.
21. Hnatushenko V.V., Vasyliiev V.V. Automatic cloud-based GIS analysis service. *Тези 16-ї Української конференції з космічних досліджень*. м. Одеса, 22-27 серпня 2016 р. С.174
22. Васильев В., Гаркуша И., Мозговой Д., Гнатушенко В. Использование радарной съемки для мониторинга природных и техногенных ландшафтов. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей: GEO-UA*, ISBN 978-966-02-8019-9 (електронне видання). м.Київ. 10-14 жовтня 2016 р. С.11-14.
23. Мозговой Д.К, Васильев В.В., Чорненко М.В. Геоинформационные Web-сервисы Eos Data Analytics. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»*. м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 54-61.

24. Мозговой Д.К., Васильев В.В. Контроль природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса LANDSAT VIEWER. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»*, м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 62-67.

25. Бусыгин Б.С., Васильев В.В., Сергеева Е.Л. О создании геоинформационной системы по возобновляемой энергетике в Украине. *Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування»*. м. Трускавець. 6–10 листопада 2017 р. С. 375-380.

26. Kavats A., Khramov D., Sergieieva K., Vasyliiev V., Kavats Y. *Geoinformation technology of agricultural monitoring using multi-temporal satellite imagery” ICAG 2018: 20th International Conference on Agriculture and Geoinformatics*. Vienna. Austria. June 14-15. 2018.

27. Васильєв В.В., Гнатушенко В.В., Кавац О.О., Кавац Ю.В. Інформаційна технологія виявлення антропогенних змін на різночасових зображеннях високого просторового розрізнення. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей GEO-UA-2018*. м.Київ. 2018. С. 34-36.

28. Васильєв В.В., Кавац О.О., Сергєєва К.Л., Храмов Д.О. Моніторинг сільськогосподарських угідь за даними Sentinel-1. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей GEO-UA-2018*. м.Київ. 2018. С. 31-33.

29. Vasyliiev V., Kussul N., Karlov E., Shelestov A., Lavreniuk M. *Satellite Crop Monitoring within World Bank project on Land Management Transparency in Ukraine. Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей GEO-UA -2018*. м.Київ. 2018. С. 31-33.

30. Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., Vasiliev V. Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 Imagery. *Big Data from Space conference (BiDS)*. 2017. P. 122-125.

31. Чандра А.М., Гош С. К. Дистанционное зондирование и географические информационные системы М.: Техносфера. – 2008. – 312 с.

32. Зацерковний В.І., Бурачек В.Г., Железняк О.О., Терещенко А.О. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя – 2014. – Кн. 1/3-38. – 492 с.
33. Tu T., Lee Y., Chang Ch., Huang P., 2005. Adjustable intensity-hue-saturation and brovey transform fusion technique for IKONOS/Quickbird imagery. *In: Optical Engineering*. Vol. 44(11).
34. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M. Regional scale crop mapping using multi-temporal satellite imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2015. P. 45–52.
35. Kussul N., Lemoine G., Gallego F. J., Skakun S. V., et al. Parcel-Based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol. 9, No. 6. P. 2500-2508.
36. M. Xiang, S. Wei, M. Zhang, M. Z. Li, Real-time Monitoring System of Agricultural Machinery Operation Information Based on ARM11 and GNSS, *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 49. Issue 16. 2016. P. 121-126.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.023>.
37. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kravchenko O. Crop area estimation in Ukraine using satellite data within the MARS project 2012. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2012. P. 3756-3759.
38. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. The use of satellite SAR imagery to crop classification in Ukraine within JECAM project. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2014. P. 1497–1500.
39. Kussul N., Skakun S., Kravchenko O., Shelestov A., et al. Application of satellite optical and SAR images for crop mapping and area estimation in Ukraine. *International Journal*
40. Lukin V., Rubel O., Kozhemiakin R., Abramov S., et al. Despeckling of Multitemporal Sentinel SAR Images and Its Impact on Agricultural Area Classification. *In Recent Advances and Applications in Remote Sensing*. IntechOpen (Chapter 2). 2018. P. 21-40.

41. Chen Y., Lin Z., Zhao X., Wang G., et al. Deep learning-based classification of hyperspectral data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7. No. 6. P.2094-2107.
42. Zhao W., Du S. Learning multiscale and deep representations for classifying remotely sensed imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2016. Vol. 113. P.155-165.
43. Kussul N., Lavreniuk N., Shelestov A., Yailymov B., et al. Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. Vol. 48. No. 5. P.42-54.
44. Kussul N., Shelestov A., Basarab R., Skakun S. et al. Geospatial Intelligence and Data Fusion Techniques for Sustainable Development Problems. *ICTERI*. 2015. P.196-203.
45. Zhang F., Du B., Zhang L. Scene classification via a gradient boosting random convolutional network framework. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016. Vol. 54, No.3. P.1793-1802.
46. Zhang F., Du B., Zhang, L. Saliency-guided unsupervised feature learning for scene classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. Vol. 353, No. 4. P. 2175-2184.
47. Lusch D. Introduction To Microwave Remote Sensing. Center For Remote Sensing and Geographic Information Science Michigan State University, 1999.
48. Куссуль Н.М., Шелестов А.Ю., Лавренюк М.С., та ін. Інформаційні технології глибинного машинного навчання для аналізу змін земного покриття. *Доповіді Національної Академії Наук України*. 2016. №8. С. 26-32.
49. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Butko I., et al. Deep Learning Approach For Large Scale Land Cover Mapping Based On Remote Sensing Data Fusion. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2016 IEEE International. 2016. P. 198-201.
50. Bakan G.M., Kussul N.N. Fuzzy ellipsoidal filtering algorithm of static object state. *Problemy Upravleniya I Informatiki (Avtomatika)*. 1996. No. 5. P. 77-92.

51. Sood K., Singh Sh., Rana R. S., Rana A, Kalia V., Kaushal A. Application of GIS in precision agriculture. National Seminar on “Precision Farming technologies for high Himalayas”. At *Precision farming development centre and High Mountain Arid Agriculture Research Institute*, Leh, Ladakh, Jammu and Kashmir, India. 2015. DOI:10.13140/RG.2.1.2221.3368.
52. Муратова Н.Р., Терехов А.Г. Технология уборки зерновых культур Казахстана в представлении спутниковых данных. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2007. Т. 4. № 2. С. 269–276
53. You X., Meng J., Zhang M., Dong T. Remote Sensing Based Detection of Crop Phenology for Agricultural Zones in China Using a New Threshold Method. *Remote Sensing*. 2013. No 5, P. 3190-3211; DOI:10.3390/rs5073190.
54. Щербенко Е.В. Мониторинг засухи по данным космических съемок. *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. М: ООО «Азбука». 2007. Т.2. С. 395-407.
55. Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis. *Remote Sens. Environ.* 2006. Vol. 105. P. 9-22.
56. Kussul N.N., Sokolov B.V., Zyelyk Ya.I., Skakun S.V., et al. Disaster risk assessment based on heterogeneous geospatial information. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2010. Vol. 42. No. 12. P. 32–45.
57. Kravchenko A., Kussul N., Lupian E., Savorsky V. Water resource quality monitoring using heterogeneous data and high-performance computations. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2008. Vol. 44. No. 4. P. 616-624.
58. 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.*, 9, 313 (2017).
59. Chen, X., Jiang J., Li, H.: Drought and Flood Monitoring of the Liao River Basin in Northeast China Using Extended GRACE Data. *Remote Sens.* 10, 1168 (2018).

60. Psomiadis, E., Soulis K. X., Zoka, Melpomeni, Dercas, N.: Synergistic Approach of Remote Sensing and GIS Techniques for Flash-Flood Monitoring and Damage Assessment in Thessaly Plain Area, Greece. *Water* 2019, 11, 448.
61. Washaya, P., Balz, T., Mohamadi, B.: Coherence Change-Detection with Sentinel-1 for Natural and Anthropogenic Disaster Monitoring in Urban Areas. *Remote Sens.*, 10, 1026 (2018).
62. Tsyganskaya, V., Martinis, S., Marzahn, P., Ludwig, R.: SAR-based detection of flooded vegetation—a review of characteristics and approaches. *International Journal of Remote Sensing* 39, 2255-2293, (2018).
63. Mason, D.C., Davenport, I.J., Neal, J.C., Schumann G.J.-P., Bates P.D.: Near real-time flood detection in urban and rural areas using high-resolution Synthetic Aperture Radar images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50, 3041–3052, (2012).
64. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O. High-performance intelligent computations for environmental and disaster monitoring. *Int. J. Information Technologies & Knowledge*. 2009. Vol. 3. P. 135–156.
65. Chen Z., Pu H., Wang B., Jiang G.-M. Fusion of hyperspectral and multispectral images: A novel framework based on generalization of pan-sharpening methods. *IEEE Geosci. Remote Sens.* 2014. Vol. 11. No. 8. P. 1418-1422.
66. Atzberger C., Formaggio A. R., Shimabukuro Y. E., Udelhoven T., et al. Obtaining crop-specific time profiles of NDVI: the use of unmixing approaches for serving the continuity between SPOT-VGT and PROBA-V time series. *International Journal of Remote Sensing*. 2014. Vol. 35. No. 7. P. 2615-2638.
67. Інтерфейс користувача Google Earth Engine. URL: <https://code.earthengine.google.com/>
68. Тематичні експлуатаційні платформи Європейського космічного агентства. URL: <https://tep.eo.esa.int>
69. Cheng J., Liu H., Liu T., Wang F., Li H. Remote sensing image fusion via wavelet transform and sparse representation. Elsevier. *Elsevier-ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2015. Vol. 104. P. 158–73.

70. Ehlers M., Klonus S., Åstrand P.J. Quality assessment for multi-sensor multi-date image fusion. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. XXXVII. Part B4.
71. González-Audícana M., Saleta J. L., Catalán R. G., García, R. Fusion of multispectral and panchromatic images using improved IHS and PCA mergers based on wavelet decomposition. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2004. Vol. 42(6). P. 1291-1299.
72. Pandit V.R., Bhiwani R.J. Image Fusion in Remote Sensing Applications: A Review. *International Journal of Computer Applications*. 2015. Vol. 120. No.10. P. 22-32.
73. Pohl C., Genderen J.L. Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods, and applications. *International Journal of Remote Sensing*. 1998. Vol. 19. P. 823-854.
74. Skakun S., Kussul N., Shelestov A. Y., Lavreniuk M., et al. Efficiency assessment of multitemporal C-band Radarsat-2 intensity and Landsat-8 surface reflectance satellite imagery for crop classification in Ukraine. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2016. Vol. 9. No. 8. P. 3712-3719.
75. Kussul N., Shelestov A., Skakun S., Kravchenko O., et al. The data fusion grid infrastructure: Project objectives and achievements. *Computing and Informatics*. 2010. Vol. 29. No. 2. P. 319-334.
76. Amolins K., Zhang Y., Dare P. Wavelet based image fusion techniques - An introduction, review and comparison. Elsevier, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. No 62: 249–263.
77. Manu C.S., Jiji C.V. A novel remote sensing image fusion algorithm using ICA bases. *Advances in Pattern Recognition (ICAPR), Eighth International Conference*. 2015. P. 244-249.
78. Mitianoudis N., Stathaki T. Adaptive image fusion using ICA bases. *In: IEEE Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing*. 2006. Vol. 2. P. 829–832.

79. Nikolakopoulos K.G. Comparison of Nine Fusion Techniques for Very High Resolution Optical Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2008. Vol. 74. No 5. P. 647-659.
80. Zhang J. Multi-source remote sensing data fusion: status and trends. *International Journal of Image and Data Fusion*. 2010. Vol. 1. No. 1. P. 5–24.
81. Han S.S., Li H.T., Gu H.Y.. The study on image fusion for high spatial resolution remote sensing images. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. XXXVII. Part B7. P. 1159-1164.
82. Attema E. P. W., Ulaby F. T.. Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*. 1978. Vol. 13. No. 2. P. 357-364.
83. Engdahl M. Multitemporal InSAR in land-cover and vegetation mapping. Aalto University. *Department of Radio Science and Engineering*. Helsinki. 2013.
84. Tamm T., Zalite K., Voormansik K., Talgre L. Relating Sentinel-1 *Interferometric Coherence to Mowing Events on Grasslands*. *Remote Sensing*. 2016. Vol. 8. No. 10. P. 802.
85. Brisco B., Brown R.J. Agricultural Applications with Radar. In: F.M. Henderson, A.J. Lewis (Eds.): Principles & Applications of Imaging Radar. *Manual of Remote Sensing. Third Edition*. 1998. Vol. 2. Wiley & Sons, New York.
86. Congalton R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote sensing of environment*. 1991. Vol. 37, No. 1. P. 35-46.
87. Cohen J. A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*. 1960. Vol. 20, No. 1. P. 37-46.
88. Rahmani S., Strait M., Merkurjev D., Moeller M., Wittman T. An adaptive IHS pan-sharpening method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2010. Vol. 7. No. 4. P. 746–750.
89. Zhang Y., Hong G. An IHS and wavelet integrated approach to improve pan-sharpening visual quality of natural colour Ikonos and QuickBird images. *Information Fusion*. 2005. Vol. 6. No. 3. P. 225–234.

90. Zhang Y., Mishra R. K. A review and comparison of commercially available pan-sharpening techniques for high resolution satellite image fusion. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 2012. P. 182-185.
91. Thomas C., Ranchin T., Wald L., Chanussot J. Synthesis of Multispectral Images to High Spatial Resolution: A Critical Review of Fusion Methods Based on Remote Sensing Physics. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2008. Vol. 46. No. 5. P. 1301–1312.119.
92. Wald L. Data Fusion: Definitions and Architectures-Fusion of Images of different Spatial Resolutions. Les Presses-Mines Paris. 2002.
93. Wang Z. A Novel Remote Sensing Image Fusion Algorithm Based on Ordinal Fast Independent Component Analysis. *First International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, (WKDD 2008)*. 23-24 January 2008. P. 142-145.
94. Palsson F., Sveinsson J.R., Ulfarsson M.O., Benediktsson J.A. Model-based fusion of multi- and hyper-spectral images using PCA and wavelets. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*. May 2015. Vol. 53. No. 5. P. 2652–2663.
95. Гнатушенко В.В., Каштан В.Ю. Технологія геометричної та спектральної корекцій оптико-електронних космічних знімків. *Вісник ХНТУ*. – Херсон, 2017. – № 3 (62). – С. 286-291.
96. Padwick C., Deskevich M., Pacifici F., Smallwood S. WorldView-2 pan-sharpening. In: *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Annual Conference*, San Diego, California. April 2010. Vol. 2630.
97. Мозговой Д. К., Корчинський В. М., Кравець О. В. Підвищення інформативності даних ДЗЗ. *Вісник ДНУ. Ракетно-космічна техніка*. 2009. Вип. 13. Т. 2. № 24. С. 48-54.
98. Hnatushenko V. V., Hnatushenko V., Kavats O.O., Shevchenko V. Y. Pansharpening technology of high resolution Multispectral and panchromatic satellite images. *Scientific bulletin of National Mining University*. 2015. No 4. P. 91-98.
99. Karathanassi V., Kolokousis P., Ioannidou S. A comparison study on fusion methods using evaluation indicators. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28. No. 10. P. 2309-2341.

100. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. 2004. Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. Vol. 13. No. 4. P. 600-612.
101. Wang, Z., and Bovik, A. C., 2002. A universal image quality index. *IEEE Signal Processing Letters* 9. P. 81-84.
102. Zhang Y. Methods for image fusion quality assessment. A review, comparison and analysis. *International Archives of the Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 2008. Vol. XXXVII. P. 1101-1109.
103. Ling Y., Ehlers M., Usery L., Madden M. FFT-enhanced IHS transform method for fusing high resolution satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. 2007. Vol. 61. P. 381-392.
104. Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A. Deep learning crop classification approach based on sparse coding of time series of satellite data. *IGARSS*. Valencia, Spain. 2018. P. 4816-4819.
105. Deng Li, Dong Yu. Deep learning: methods and applications. *Foundations and Trends in Signal Processing*. 2014. Vol. 7.3. No. (3-4). P. 197-387.
106. Geng J., Fan J., Wang H., Ma X., Li B., Chen F. High-resolution SAR image classification via deep convolutional autoencoders. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2015. Vol. 12. No. 11. P 2351-2355.
107. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Kussul O. et al. Resilience Aspects in the Sensor Web Infrastructure for Natural Disaster Monitoring and Risk Assessment Based on Earth Observation Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2014. Vol. 7. No. 9. P. 3826–3832.
108. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Grid and sensor web technologies for environmental monitoring. *Earth Science Informatics*. 2009. Vol. 2. No. 1-2. P. 37-51.
109. Kussul N., Mandl D., Moe K., Mund J.P., Post J., Shelestov A., Skakun S., Szarzynski J., Langenhove G., Handy M. Interoperable Infrastructure for Flood Monitoring: SensorWeb, Grid and Cloud. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2012. Vol. 5. No. 6. P. 1740–1745.

110. Shelestov A.Yu., Kussul N.N. Using the fuzzy-ellipsoid method for robust estimation of the state of a grid system node. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2008. Vol. 44. No. 6. P. 847-854.

111. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. Vol. 5. No. 17. P. 1-10.

112. Yang C., Yu M., Hu F., Jiang Y., Li Y. Utilizing cloud computing to address big geospatial data challenges. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2017. Vol. 61. P. 120-128.

113. Dikaiakos M. D., Katsaros D., Mehra P., Pallis G., Vakali A. Cloud Computing: Distributed Internet Computing for IT and Scientific Research. *Internet Computing*. 2009. Vol. 13. No. 5. P. 10-13.

113. Черняк Л. SaaS конец начала. Открытые системы. URL: <http://www.osp.ru/os/2007/10/4706040/>.

114. Lecca G., Petitdidier M., Hluchy L., Ivanovic M., Kussul N., Ray N. Thieron V. Grid computing technology for hydrological applications. *Journal of Hydrology*. 2011. Vol. 403. No. 1-2. P. 186-199.

115. КуССуль Н.Н., Шелестов А.Ю. Grid-системы для задач исследования Земли. Архитектура, модели и технологии. Киев: Наукова думка. 2008. 452 с.

116. Kussul O., Kussul N., Skakun S. Assessing security threat scenarios for utility-based reputation model in Grid. *Computers & Security*. 2013. Vol. 34. P. 1-15.

117. Kussul N., Shelestov A., Skakun S. Technologies for Satellite Data Processing and Management Within International Disaster Monitoring Projects. *In Grid and Cloud Database Management Grid Fiore*. S. Aloisio, G. (Eds.). 2011. Springer. P. 279-305.

118. Amro I. A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing Journal on Advances in Signal Processing*. 2011. Vol. 79.

119. Chaudhari P., Chaudhari M.B., Panchal SD. A review on multisensor image fusion techniques. *International Journal of Engineering Research and General Science*. 2014. Vol. 2(3). P.342–347.
120. Vivone G., Alparone L., Chanussot J., Dalla Mura M., Garzelli A. , Licciardi G.A., Restaino R., Wald L. A Critical Comparison among Pansharpening Algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2015. Vol. 53. No. 5. P. 2565–2586.
121. Портал аналізу супутникових даних. URL: <https://eos.com/landviewer/>
122. Estornell J., Martí-Gavliá J.M., Sebastiá M.T., Mengual J. Principal component analysis applied to remote sensing. *Modelling in Science Education and Learning*. 2013. Vol. 6. P. 83-89.
123. Kussul N., Skakun S., Shelestov A., Lavreniuk M. Large Scale Crop Classification in Ukraine using Multi-temporal Landsat-8 Images with Missing Data. *American Geophysical Union Fall Meeting (AGU 2014)*. San Francisco. 2014.
124. Mnih V., Hinton G. E. Learning to detect roads in high-resolution aerial images. *In European Conference on Computer Vision*. 2010. P. 210-223.
125. Lavreniuk M., Kussul N., Meretsky M., Lukin V., et al. Impact of SAR data filtering on crop classification accuracy. *First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering*. 2017. P. 912-916.
126. Ferrazzoli P. SAR for agriculture: advances, problems and prospects. *Proceedings of the Third International Symposium on Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. Sheffield, UK. September 11-14, 2001. P. 47-56.
127. Memarsadeghi N., Netan-yahu N., LeMoignc J. Fast Implementation of the ISODATA Clustering Algorithm. *International Journal of Computational Geometry and Applications*. 2007. Vol. 17. P. 71-103.
128. Snapir B., Waive T.W., Corstanje R., Redfern S., De Silva J., Kirui C. Harvest Monitoring of Kenyan Tea Plantations With X-Band SAR. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2018. Vol. 11. No. 3. P. 930-938.

129. MOD09Q1 - MODIS/Terra Surface Reflectance 8-Day L3 Global 250m SIN Grid. URL: <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/products/land-surface-reflectance/MOD09Q1/>

130. Huffman G., Bolvin D., Nelkin E., 2018: Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM (IMERG), version 5B. NASA's Precipitation Processing Center, accessed 10 November, 2018, <ftp://jsimpson.pps.eosdis.nasa.gov/NRTPUB/imerg/gis/>

131. Sentinel Application Platform (SNAP). URL: <https://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>

132. Busetto L., Ranghetti L. MODISstsp: An R package for automatic preprocessing of MODIS Land Products time series. Computers & geosciences, 2016. Vol. 97. P. 40-48.

133. Team R.C. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna. Austria. 2013. ISBN 3-900051-07-0. URL:<http://www.R-project.org/>.

ДОДАТОК А

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ АВТОРА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Роботи, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Hnatushenko V.V, Hnatushenko Vik.V., Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.** Satellite technology of the forest fires effects monitoring. *Scientific bulletin of National Mining University. — State Higher Educational Institution «National Mining University».* Dnipropetrovsk. 2016. No.1 (151). P. 70–76.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: аналіз існуючих ГІС-технологій, методів оцінки наслідків лісових пожеж)

2. Hnatushenko V.V., Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Kavats O.O. Satellite Monitoring of Consequences of Illegal Extraction of Amber in Ukraine. *Scientific bulletin of National Mining University. - State Higher Educational Institution «National Mining University».* Dnipro. 2017. No.2 (158). P. 99–105.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія моніторингу незаконного видобутку бурштину в Україні за даними ДЗЗ)

3. 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.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія оцінки наслідків вирубок лісових масивів за даними ДЗЗ на базі хмарної платформи)

4. Kussul N., Lavreniuk M., Sumilo L., Kolotii A., Rakoid O., Yailymov B., Shelestov A., **Vasiliiev 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.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: воркфлоу моніторингу цілей сталого розвитку в хмарному середовищі)

5. 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, 836. P. 134–145.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи)

6. 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*. 2019, doi:10.1109/tbdata.2019.2940237.

(Індексується у Scopus. Журнал віднесено до першого квартиля (Q1). Особистий внесок: архітектура хмарної системи обробки часових рядів супутникових даних)

7. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Мониторинг природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса Landsat Viewer. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т. 24. Вип.19. С. 95–101.

(Особистий внесок: автоматизація методології моніторингу антропогенних процесів за багатоканальними супутниковими зображеннями у хмарному Web – сервісі)

8. Mozgovoy D.K., Serikov I.Ju., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V. V. Automatic vegetation classification using multispectral aerial images and neural network. *Регіональний міжвузівський збірник наукових праць «Системні технології»*. Дніпро. 2016. №6 (107). С. 66-72.

(Особистий внесок: автоматизація методу розпізнавання і класифікації рослинності на багатоспектральних аерознімках з використанням нейронної мережі)

Роботи, що додатково відображають наукові результати дисертації:

9. **Васильев В.В.**, Мозговой Д.К. Анализ многолетней засухи по данным Landsat 8. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія «Ракетно-космічна техніка»*. 2016. №4, Т. 24. Вип.19. С.79-89.

(Особистий внесок: Web-архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки багатовимірних геопросторових даних)

10. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Оценка последствий лесных пожаров по данным ДЗЗ. *Інформаційні системи, механіка та керування*. № 14 (2016). С. 42–52.

(Особистий внесок: автоматизація воркфлоу ідентифікації та оцінки зон ураження територій лісових масивів за різночасовими багатоканальними супутниковими зображеннями)

11. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Мониторинг вырубок лесов по космоснимкам. *Механіка гіроскопічних систем*. №31 (2016). С. 75–86. *(Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія моніторингу вирубок лісових масивів)*

Роботи, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

12. Hnatushenko V.V., **Vasyliiev V.V.** Remote sensing image fusion using ICA and optimized wavelet transform. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLI-B7. 2016. XXIII ISPRS Congress. 12–19 July 2016. Prague, Czech Republic. P. 653-659.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод підвищення деталізації об'єктів на багатоспектральних знімках за допомогою ICA та оптимізованого вейвлет-перетворення)

13. Hnatushenko V.V., Garkusha I. N., **Vasyliiev V.V.** Creating soil moisture maps based on radar satellite imagery. *Proc. SPIE 10426. Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring*. 104260J (3 October 2017). Warsaw, Poland. <http://dx.doi.org/10.1117/12.2278040>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод побудови карт вологості на основі часових рядів радіолокаційних даних та запропоновано його реалізацію у хмарному середовищі)

14. Hnatushenko Volodymyr V., Garkusha Igor N., **Vasyliiev Volodymyr V.** Research of Influence of Atmosphere and Humidity on the Data of Radar Imaging by Sentinel-1. 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Proceedings. P. 405-408.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизований пошук критеріїв впливу атмосфери при побудові карт вологості за радіолокаційними даними)

15. Hnatushenko V.V., Garkusha I.N., **Vasyliiev V.V.** Using SENTINEL-1 data for monitoring of soil moisture. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. July 23–28. 2017. Fort Worth, Texas, USA. P.1656-1659 <http://ieeexplore.ieee.org/document/8127291>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод моніторингу вологості ґрунту за даними SENTINEL-1 та його реалізацію у хмарному сервісі)

16. Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V.V. Accuracy Evaluation of Automated Object Recognition Using Multispectral Aerial Images and Neural Network. Proc. SPIE 10806, Tenth International Conference on Digital Image Processing (ICDIP 2018), 108060H (9 August 2018); doi:10.1117/12.2502905.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: дослідження оцінки точності розпізнавання об'єктів з використанням багатоспектральних аерофотознімків класифікованих методами нейронних мереж)

17. Mozgovyi D.K., **Vasyliiev V.V.**, Hnatushenko V.V. Automated recognition of vegetation and water bodies on the territory of megacities in satellite images of visible and IR bands. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. IV-3. P.167-172. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-3-167-2018>.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: метод і автоматизована інформаційна технологія (воркфлоу) попередньої обробки супутникових даних до рівня L2)

18. Shelestov A., Kolotii A., Lavreniuk M., Medyanovskyi K., **Vasiliev V.**, Bulanaya T., Gomilko I. Air Quality Monitoring in Urban Areas Using in-Situ and Satellite Data Within Era-Planet Project. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Spain, Valencia. 2018. P. 1668–1671.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: хмарна технологія моніторингу якості повітря на основі наземних та супутникових даних)

19. Kussul N., Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., **Vasiliev V.** Land Cover and Land Use Monitoring Based on Satellite Data within World Bank Project. *Conference Proceedings of 2019 10th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies*. DESSERT 2019. No. 8770040. P. 127–130.

(Індексується у Scopus. Особистий внесок: автоматизація обробки даних на базі хмарної платформи)

20. Hnatushenko V.V., Polyakov M.V., **Vasyliiev V.V.** Urban change detection method of multi-temporal remote sensing images. *World Congress on GIS and Remote Sensing*. August 01-03, 2016. New Orleans, USA. J Remote Sensing & GIS 2016. 5:3(Suppl) <http://dx.doi.org/10.4172/2469-4134.C1.003>.

(Особистий внесок: автоматизована інформаційна технологія виявлення змін на різночасових зображеннях у інформаційну систему хмарної обробки)

21. Hnatushenko V.V., **Vasyliiev V.V.** Automatic cloud-based GIS analysis service. тези 16-ї Української конференції з космічних досліджень. Одеса, 22-27 серпня 2016р. С. 174.

(Особистий внесок: архітектура сервіс-орієнтованої системи хмарної обробки та ГІС аналізу)

22. **Васильев В.**, Гаркуша И., Мозговой Д., Гнатушенко В. Использование радарной съемки для мониторинга природных и техногенных ландшафтов. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: Матеріали доповідей: (м. Київ, 2016 р.)* - GEO-UA, 2016. ISBN 978-966-02-8019-9 (електронне видання). С. 11–14.

(Особистий внесок: хмарна технологія оперативного доступу до архівних супутникових даних)

23. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.**, Чорненко М.В. Геоинформационные Web-сервисы Eos Data Analytics. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»*. м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 54–61.

(Особистий внесок: функціональна геоінформаційних хмарних Web-сервісів)

24. Мозговой Д.К., **Васильев В.В.** Контроль природных и антропогенных процессов с помощью Web-сервиса LANDSAT VIEWER. *Международный научно-практический форум «НАУКА И БИЗНЕС»* м. Днепр. 1 июля 2016 г. С. 62–67.

(Особистий внесок: автоматизація методу виявлення антропогенних процесів за різночасовими супутниковими зображеннями у системі хмарної обробки)

25. Бусыгин Б.С., **Васильев В.В.**, Сергеева Е.Л. О создании геоинформационной системы по возобновляемой энергетике в Украине. Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції «Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування». м. Трускавець. 6–10 листопада 2017 р. С. 375–380.

(Особистий внесок: Web-сервіс обробки зображень високого просторового розрізнення)

26. Kavats A., Khramov D., Sergieieva K., **Vasyliiev V.**, Kavats Y. Geoinformation technology of agricultural monitoring using multi-temporal satellite imagery. ICAG 2018: 20th International Conference on Agriculture and Geoinformatics, Vienna, Austria. June 14-15, 2018.

(Особистий внесок: автоматизація методу моніторингу агротехнічних операцій за часовими рядами супутникових даних у хмарній інформаційній системі)

27. Гнатушенко В.В., Кавац О.О., Кавац Ю.В., **Васильев В.В.**, Інформаційна технологія виявлення антропогенних змін на різночасових зображеннях високого просторового. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 34–36.

(Особистий внесок: архітектура хмарної обробки різночасових супутникових зображень високого просторового розрізнення)

28. Кавац О.О., Сергеева К.Л., Храмов Д.О., **Васильев В.В.** Моніторинг сільськогосподарських угідь за даними Sentinel-1. *Аерокосмічні спостереження в*

інтересах сталого розвитку та безпеки. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 31–33.

(Особистий внесок: автоматизація методу побудови карт когерентності з урахуванням часового ряду даних про опади і фенологічного календаря)

29. **Vasyliiev Volodymyr**, Kussul Nataliia, Karlov Eugene, Shelestov Andrii, Lavreniuk Mykola Satellite Crop Monitoring within World Bank Project on Land Management Transparency in Ukraine. *Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. Матеріали доповідей GEO-UA. м. Київ, 2018. С. 31-33.*

(Особистий внесок: автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі)

30. Shelestov A., Lavreniuk M., Kolotii A., **Vasiliev V.** Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *Big Data from Space conference (BiDS). 2017. P. 122–125.*

(Особистий внесок: автоматизовані методи обробки часових рядів супутникових даних в хмарному середовищі)

ДОДАТОК Б
ДОКУМЕНТИ ЩОДО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Васильєва Володимира Володимировича
**«Розробка інформаційних систем хмарної обробки багатовимірних
геопросторових даних»,**
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю
05.07.12 — «Дистанційні аерокосмічні дослідження»

Результати дисертаційної роботи Васильєва В.В., поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 використані в ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА» при розробці розподіленої інформаційної системи LandViewer.

А саме, в основу системи LandViewer покладено методи виділення інформативних ознак на супутникових знімках (вибору комбінацій інформативних каналів для різних застосувань), методи ефективного доступу до багатоспектральних супутникових зображень та зберігання даних різного просторового та часового розрізнення у хмарному середовищі Amazon Web Services.

Запропоновані архітектурні та технічні рішення забезпечують швидкий доступ до супутникових даних, що зберігаються у хмарному середовищі Amazon Web Services у структурованій формі гомогенних складових частин окремих знімків часового ряду, збереження їх в оптимальному форматі та використання алгоритмів швидкого відображення даних. Вищезазначені алгоритми та методи дозволили на 30% підвищити загальну швидкодію побудови геопросторових продуктів в реальному часі, таких як маска хмарності, моніторинг забудови, вирубки лісів, картографування виконання агротехнічних операцій на основі інтерферометричного аналізу радарних даних тощо.

Директор

ТОВ «ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС УКРАЇНА»



Пархоменко В.О.

ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи
Васильєва Володимира Володимировича
**«Розробка інформаційних системи хмарної обробки багатовимірних
геопросторових даних»,**
поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за
спеціальністю 05.07.12 — «Дистанційні аерокосмічні дослідження»

Результати дисертаційної роботи Васильєва В.В., поданої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.07.12 — «Дистанційні аерокосмічні дослідження», використані в ДФ НЦУВКЗ «Дніпрокосмос» при попередній обробці багатовимірних геопросторових даних.

Метод підвищення інформативності та деталізації об'єктів на багатоканальних супутникових знімків на основі ІСА та вейвлет-перетворення, застосовується до широкого кола сучасних оптичних супутникових даних низького просторового розрізнення. Що дозволяє підвищити інформативність багатоканальних супутникових даних шляхом застосування ІСА та оптимізованої вейвлет-трансформації панхроматичних та мультиспектральних складових. Синтезоване зображення отримане після застосування методу відрізняється від первинного зображення, чіткістю та деталізацією об'єктів, а пакетне застосування методу дозволяє суттєво зменшує час обробки та скоротити обчислювальні ресурси.

Начальника філії
ДФ НЦУВКЗ «Дніпрокосмос»

28.05.2019



В. В. Кавац