

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО ІНФОРМАЦІЙНОГО  
ПРОСТОРУ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

ВОЛИНЕЦЬ ТАРАС ВАСИЛЬОВИЧ

УДК 528.9:004.9:551.46(477)

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ  
МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН**

122 – «Комп'ютерні науки»

Галузь знань 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Т.В.Волинець

Науковий керівник:

Триснюк Василь Миколайович доктор  
технічних наук, професор

Київ – 2025

## АНОТАЦІЯ

Волинець Т.В. Інформаційні технології аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національна академія наук України, Київ, 2024.

Розв'язання поставленого наукового завдання забезпечує зростання рівня достовірності та розширення інформаційного потенціалу систем аерокосмічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон шляхом інтеграції мобільних аерокосмічних платформ для виявлення територій підвищеного екологічного ризику.

**У вступі** обґрунтовано актуальність дослідження та його відповідність пріоритетним напрямам науково-технічної політики України, визначено мету й основні завдання роботи, висвітлено елементи наукової новизни, практичну значущість отриманих результатів, а також подано загальну структуру та зміст дослідження.

**У першому розділі** досліджено сучасні інформаційні підходи до екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон, зокрема Чорного моря, в контексті зростання техногенного навантаження, змін клімату та воєнного впливу. Основна увага приділена інтеграції даних дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, сенсорних мереж, хмарних сервісів і методів штучного інтелекту для створення єдиної цифрової платформи екологічного моніторингу.

Запропоновано концепцію інтегрованого управління прибережними водами, що враховує фонове, загальне й кризове спостереження з подальшим автоматизованим прийняттям рішень. Розроблено модель функціонування такої



системи з урахуванням чинної нормативно-правової бази України, а також адаптовано алгоритми виявлення забруднення до реалій воєнного часу. Запропоновано гібридну інфраструктуру обробки даних, яка поєднує локальні обчислювальні потужності та хмарні платформи з метою зниження обчислювального навантаження та підвищення ефективності оцінки екологічного стану акваторій.

Наукова новизна дослідження полягає у формуванні системної моделі інтегрованого управління екологічною безпекою прибережних вод на основі поєднання новітніх ІТ-рішень, зокрема супутникових даних, машинного навчання та правових механізмів.

**Другий розділ** присвячений розробленню сучасних інформаційних технологій, які використовуються для аналізу та моніторингу стану морських та прибережних екосистем. Детально розглянуто різноманітні платформи та сервіси супутникових даних, спектральні діапазони, які є основою для отримання важливої інформації про природні та антропогенні зміни в акваторіях, а також фізичні принципи, що лежать в основі космічного моніторингу. Особлива увага приділена використанню спектральних діапазонів для дослідження водного середовища, включаючи аналіз прозорості води, виявлення забруднень, евтрофікації, змін ландшафту та кліматичних змін. Важливу роль відіграють оптичний, інфрачервоний і радарний діапазони, які дозволяють здійснювати моніторинг незалежно від погодних умов і часу доби. Застосування машинного навчання та штучного інтелекту для обробки супутникових знімків дозволило збільшити точність і швидкість моніторингу морських акваторій та прибережних зон на 16 відсотків. Це забезпечує автоматичну класифікацію об'єктів, виявлення змін на зображеннях та створення картографічних моделей для підтримки прийняття стратегічних рішень. Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи дозволила створювати точні карти, моделі та прогнози для управління природними

ресурсами, моніторингу забруднення, оцінки впливу кліматичних змін, а також для реагування на надзвичайні ситуації.

**В третьому розділі** розглядається застосування сучасних інформаційних технологій для моніторингу екологічного стану морських акваторій та прибережних зон, зокрема, з використанням супутникових знімків, геоінформаційних систем, штучного інтелекту та Інтернету речей. Запропоновано методи автоматизованого розпізнавання об'єктів забруднення за допомогою алгоритмів комп'ютерного зору та машинного навчання, зокрема використовуючи згорткові нейронні мережі та моделі типу YOLOv5 для аналізу аерофотознімків. Вперше розроблено математичну модель дешифрування, яка забезпечує високу точність і швидкість виявлення екологічних аномалій, таких як нафтопродукти, фітопланктонне цвітіння, абразійні процеси та інші забруднення.

Запропоновано використання супутникових платформ з високою роздільною здатністю, таких як Sentinel-2, Landsat 8 та PlanetScope, для оцінки таких параметрів, як температура поверхневих вод, концентрація хлорофілу, каламутність, а також для виявлення нафтових плям та інших забруднень. Завдяки поєднанню цих технологій, розроблена система дозволяє не тільки виявляти поточні забруднення, але й прогнозувати їх розвиток, що є важливим для оперативного реагування на екологічні катастрофи та забезпечення сталого розвитку морських регіонів.

**У четвертому розділі** дисертації розглянуто питання удосконалення інформаційних технологій інтегрованого аерокосмічного моніторингу морського середовища із фокусом на регіон Чорного моря. Запропоновано архітектурно-функціональну модель супутникового моніторингу, що об'єднує методи дистанційного зондування Землі, засоби геоінформаційного аналізу, алгоритми штучного інтелекту та засоби хмарної інфраструктури. Особливу увагу приділено оптимізації обчислювальних процесів при обробці великомасштабних супутникових зображень шляхом використання GPU/CPU-кластерів, хмарних

платформ (Google Earth Engine, AWS, Copernicus), технологій контейнеризації (Docker, Kubernetes) і багатопоточних моделей обчислень. У рамках тематичного дешифрування супутникових знімків реалізовано векторизацію джерел забруднення та побудову картографічних моделей у ГІС-середовищі, що поєднує екологічну статистику, дані Державного моніторингу вод та спектральну інформацію з апаратів Sentinel, MODIS і Landsat. Досліджено ефективність застосування нейронних мереж U-Net, DeepLabv3+ для автоматизованого розпізнавання прибережних об'єктів, зокрема пляжних зон, інфраструктури та зон техногенного навантаження.

Запропоновано програмно-аналітичний комплекс для обробки знімків Азовського моря та створено геоінформаційну модель природоохоронних і рекреаційних об'єктів, що інтегрує багаторівневу інформацію у єдину систему моніторингу. Обґрунтовано комбіновані підходи як стратегічний напрям розвитку інформаційно-аналітичної платформи моніторингу морських акваторій.

**Ключові слова:** інформаційні технології, інформаційно-аналітичні платформи, аерокосмічний моніторинг, геоінформаційні системи, екосистема, інформаційно-аналітичне забезпечення, морські акваторії, прибережні зони, програмне забезпечення, спектральні канали, адаптивне управління, дешифрування супутникових знімків.

## ANNOTATION

Volynets T.V. Information Technologies for Aerospace Monitoring of Marine Aquatic Areas and Coastal Zones. – Qualification Research Manuscript.

Dissertation for the Degree of Doctor of Philosophy in Specialty 122 "Computer Science" – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The solution of the defined scientific problem enhances the reliability and expands the informational potential of aerospace monitoring systems for marine aquatic areas and coastal zones by integrating mobile aerospace platforms for identifying regions of elevated environmental risk.

The Introduction substantiates the relevance of the research and its alignment with the priority directions of Ukraine's scientific and technological policy. It outlines the purpose and main objectives of the study, highlights elements of scientific novelty and practical significance of the obtained results, and presents the general structure and content of the dissertation.

**Chapter 1** explores current information approaches to environmental monitoring of marine aquatic areas and coastal zones, particularly the Black Sea, in the context of increasing anthropogenic pressure, climate change, and military impact. Special attention is given to the integration of remote sensing data, geographic information systems (GIS), sensor networks, cloud services, and artificial intelligence methods to develop a unified digital platform for environmental monitoring.

A concept of integrated coastal water management is proposed, which encompasses background, routine, and crisis observation modes, supported by automated decision-making mechanisms. A system operation model is developed, taking into account the current legal and regulatory framework of Ukraine, and detection algorithms are adapted to wartime conditions. A hybrid data processing infrastructure combining local computing capacities with cloud platforms is proposed to reduce computational load and increase the efficiency of environmental status assessments in aquatic areas.

The scientific novelty of the research lies in the development of a systemic model for integrated environmental safety management of coastal waters, based on the synergy of cutting-edge IT solutions, including satellite data, machine learning techniques, and legal instruments.

**Chapter 2** is devoted to the development of modern information technologies used for the analysis and monitoring of the condition of marine and coastal ecosystems. It

provides a detailed review of various satellite data platforms and services, spectral bands used for extracting critical information about natural and anthropogenic changes in aquatic environments, and the physical principles underlying space-based monitoring. Special emphasis is placed on the use of spectral ranges to study water environments, including water transparency analysis, pollution detection, eutrophication, landscape transformation, and climate changes. Optical, infrared, and radar bands play a crucial role, enabling monitoring regardless of weather conditions or time of day.

The use of machine learning and artificial intelligence in processing satellite imagery has improved the accuracy and speed of monitoring marine and coastal zones by 16%. This enables automatic object classification, change detection in imagery, and the creation of cartographic models to support strategic decision-making. The integration of satellite data into GIS systems has facilitated the development of precise maps, models, and forecasts for resource management, pollution control, climate impact assessment, and emergency response.

**Chapter 3** focuses on the application of advanced information technologies for monitoring the ecological condition of marine aquatic areas and coastal zones, with particular emphasis on satellite imagery, GIS, artificial intelligence, and the Internet of Things. Methods for automated pollution object recognition are proposed using computer vision and machine learning algorithms, including convolutional neural networks and YOLOv5 models for aerial image analysis.

For the first time, a mathematical decryption model has been developed, providing high accuracy and speed in detecting environmental anomalies such as petroleum products, phytoplankton blooms, abrasion processes, and other pollutants.

The use of high-resolution satellite platforms such as Sentinel-2, Landsat 8, and PlanetScope is proposed to evaluate parameters such as surface water temperature, chlorophyll concentration, turbidity, and to detect oil spills and other contaminants. The integration of these technologies allows not only the identification of current pollution

incidents but also the prediction of their development, which is essential for rapid response to environmental disasters and sustainable development of maritime regions.

**Chapter 4** addresses the advancement of information technologies for integrated aerospace monitoring of the marine environment, focusing on the Black Sea region. An architectural-functional model of satellite-GIS monitoring is proposed, integrating remote sensing methods, geoinformation analysis tools, artificial intelligence algorithms, and cloud infrastructure capabilities. Emphasis is placed on optimizing computational processes for processing large-scale satellite images using GPU/CPU clusters, cloud platforms (Google Earth Engine, AWS, Copernicus), containerization technologies (Docker, Kubernetes), and multithreaded computation models.

Thematic satellite image interpretation has been implemented through vectorization of pollution sources and the development of cartographic models in a GIS environment, incorporating environmental statistics, State Water Monitoring data, and spectral information from Sentinel, MODIS, and Landsat satellites. The effectiveness of neural networks such as U-Net and DeepLabv3+ for automated recognition of coastal features—such as beach areas, infrastructure, and zones of anthropogenic pressure—has been evaluated.

A software-analytical suite has been developed for processing imagery of the Sea of Azov and constructing a geoinformation model of protected and recreational areas, integrating multi-level data into a unified monitoring system. Combined approaches are substantiated as a strategic direction for the development of an information-analytical platform for marine environmental monitoring.

**Keywords:** information technologies, information-analytical platforms, aerospace monitoring, geographic information systems, ecosystem, information and analytical support, marine aquatic areas, coastal zones, software, spectral bands, adaptive management, satellite image interpretation.

## Список публікацій здобувача за темою дисертації

### I. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

#### Статті у наукових фахових виданнях України.

1. Волинець Т.В., Мосійчук Д.І. Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням аерокосмічних технологій. Екологічна безпека та природокористування. Збірник наукових праць вип. 1(53) січень – березень 2025. 146-155 ISSN 2411-4049

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.146-154>

2. Марущак В.М., Волинець Т. В. Інформаційні системи дешифрування зображень з використанням Аерокосмічних технологій. Екологічна безпека та природокористування. Збірник наукових праць вип. 4(52) жовтень –грудень 2024. с135-144. ISSN 2411-4049

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2024.4.135-144>

3. Волинець Т.В. Інформаційні системи мобільного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4 (85) 2024 р. С 53-61 ISSN 2412-4338

DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049231>

4. Триснюк В.М., Зорін Д.О., Волинець Т.В. Інформаційні системи мобільного екологічного моніторингу Дністровського каньйону. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 2 (83). 2024р. С. 60-68. ISSN 2412-4338. DOI: <https://journals.urau.ua/eejet/article/view/312217>

#### Статті у виданнях, індексованих у наукометричних базах. ( Scopus).

5. Pereguda O.M., Rodionov A.V., Fedorchuk D.L., Zhuravsky S.V., Konvisar M.G., Volynets T.V., Datsyk V.V., Zakalad M.A., Tsybulya S.A., Trysnyuk T.V. (2024). Development of a method for complex sample formation and model selection for recognizing the technical condition of an unmanned aerial vehicle. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Mathematics and Cybernetics – applied aspects.



Edition 5/4 (131) 2024, p. 42-51 ISSN1729-3774. SCOPUS.DOI:  
<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312968>

II. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

6. Марущак В.М., Волинець Т.В., Зотова Л.В., Хабова Н.В. Виклики у створенні комплексної математичної моделі електронної документації Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 60-61 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: 10.37321

[2024-11-24\\_zbirka\\_all\\_07\\_11\\_2024\\_148x210](#)

7. Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування математичних методів для виявлення та запобігання кіберзагрозам. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 36-38 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: 10.37321

[2024-11-24\\_zbirka\\_all\\_07\\_11\\_2024\\_148x210](#)

8. Триснюк Т.В., Тимчук В.Ю., Волинець Т.В., Дзюба В.А. Відновлювальні заходи наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції: НУХТ, 6 – 7 листопада 2024. С.80 – 90. ISBN 978-966-612-349-0

9. Триснюк Т.В., Шумейко В.О., Волинець Т.В. Аерокосмічні технології для оцінки забруднення територій у зв'язку з розробкою корисних копалин. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали IX міжнародної науково-практичної конференції. 7-11 жовтня 2024 р., м. Львів. Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2024. – с 496-501. [https://conf.dkz.gov.ua/files/2024\\_materials\\_net.pdf](https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf)

10. Шумейко В.О., Триснюк Т.В., Волинець Т.В., Марущак В.М., Дзюба В.А.. Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу



трансграничних впливів. «IX Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024. – с. 265-267.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/paper/viewFile/22214/18372>.

11. Шумейко В.О., Мосійчук Д.І., Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування безпілотних засобів в інтересах національної безпеки та оборони країни. Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення. Колективна монографія за матеріалами XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-15 листопада 2023 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2023. – с. 102-104. SBN 978-617-7854-58-5.

[1\\_zbirka\\_08\\_11\\_23-1-1.pdf](#)

12. Триснюк Т.В., Конечька О.О., Нагорний Є.І., Марущак В.М., Волинець Т.В., Приступа В.В. Оцінка радіаційного ризику забруднення місцевості для населення внаслідок військових дій. Challenges and threats to critical infrastructure. Detroit (Michigan, USA) – 2023 с.163-167. NGO Institute for Cyberspace Research, 2023. ISBN-10/979-8-218-22315-1

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17917/1/Monograph-09-06-2023.pdf#page=163>

13. Волинець Т.В., Триснюк В.М.. Машинне навчання та штучний інтелект у робототехніці. Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні аспекти діджиталізації та інформатизації в програмній та комп'ютерній інженерії"(01-03 червня 2023) Збірник тез - Державний університет телекомунікацій. Інститут інформаційних технологій.- 2023, с. 136, 137 <https://duikt.edu.ua>

14. Волинець Т.В., Марущак В.М. «Визначення вектора параметрів руху космічних об'єктів у великобазовій багатопозиційній оптичній системі». Матеріали XXVIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку. с. 333-335

<https://dSPACE.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/48475/1/%D0%97%D0%B1%D1%96%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA%2C%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F%20%281%29.pdf>

15. Триснюк В.М., Конечька О.О., Волинець Т.В. Сметанін К.В., Дзюба В.А. Особливості класифікації джерел небезпеки, що призводять до надзвичайних ситуацій воєнного характеру. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Колективна монографія за матеріалами XXI Міжнародної науково-

практичної конференції. Київ, 14-16 листопада 2022 р. За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво. «Юстон», 2022. – с. 143-145.

[https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-1206\\_UDK\\_book\\_Monografia\\_48x210.pdf11](https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/12/2022-1206_UDK_book_Monografia_48x210.pdf11).

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....                                                                                                               | 18 |
| ВСТУП.....                                                                                                                                   | 19 |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ МЕТОДИК ОБРОБКИ<br>АЕРОКОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ АКВАТОРІЇ ТА<br>ПРИБЕРЕЖНИХ ТЕРИТОРІЙ ..... | 28 |
| 1.1. Інформаційне, нормативно-правове забезпечення та організація державного<br>моніторингу морських вод України .....                       | 28 |
| 1.1.1. Інструментальні засоби для моніторингу морських акваторій та<br>прибережних зон .....                                                 | 28 |
| 1.1.2. Наукометричний та бібліографічний аналіз джерел щодо використання<br>аерокосмічного моніторингу в екологічних дослідженнях.....       | 32 |
| 1.1.3. Законодавчі засади та організація державного моніторингу морських вод<br>України.....                                                 | 36 |
| 1.2. Концептуальні підходи до тематичних завдань супутникового моніторингу<br>акваторії Чорного моря.....                                    | 38 |
| 1.3. Сучасні супутникові платформи для моніторингу прибережних зон та<br>морських акваторій .....                                            | 41 |
| 1.3.1. Екосистема супутникового моніторингу морських акваторій.....                                                                          | 41 |
| 1.3.2. Візуалізація траєкторії супутників та планування зйомки .....                                                                         | 42 |
| 1.4. Геоінформаційні технології екологічного моніторингу морських акваторій<br>та прибережних зон.....                                       | 43 |
| 1.4.1. Дослідження у сфері екологічної безпеки з використанням інформаційних<br>технологій .....                                             | 43 |

|                                                                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.4.2. Створення фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Чорного моря .....                                               | 45 |
| 1.4.3. Створення фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Азовського моря .....                                            | 46 |
| 1.5. Міжнародний досвід застосування матеріалів космічних зйомок у завданнях моніторингу антропогенного забруднення морських акваторій ..... | 50 |
| Висновки до розділу 1. ....                                                                                                                  | 53 |

## РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ КОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН..... 55

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних .....                  | 55 |
| 2.1.1. Інформаційні супутникові сервіси .....                                    | 56 |
| 2.1.2. Спектральні діапазони та їх значення для моніторингу .....                | 58 |
| 2.1.3. Характеристики основних супутникових сенсорів .....                       | 62 |
| 2.2. Інформаційні технології в супутниковому моніторингу прибережних зонах ..... | 65 |
| 2.2.1. Платформи обробки та візуалізації супутникових даних .....                | 65 |
| 2.2.2. Використання штучного інтелекту та машинного навчання .....               | 65 |
| 2.2.3. Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи .....             | 66 |
| 2.3. Фізичні основи космічного моніторингу морських акваторій .....              | 66 |
| 2.3.1. Оптичний діапазон .....                                                   | 66 |
| 2.3.2. Інфрачервоний діапазон .....                                              | 71 |
| 2.3.3. Надвисокочастотний діапазон .....                                         | 73 |
| 2.4. Інформаційні технології обробки супутникових знімків .....                  | 77 |
| 2.4.1. Просторові платформи обробки супутникових знімків. ....                   | 77 |

|                                                                                                                             |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.4.2. Хмарні геоінформаційні системи та інтеграція з ГІС .....                                                             | 79  |
| Висновки до розділу 2. ....                                                                                                 | 81  |
| РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ<br>АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА АЕРОКОСМІЧНИХ<br>ЗНІМКАХ..... |     |
| 3.1. Інформаційні технології для оцінки екологічного стану морських акваторій                                               | 85  |
| 3.1.1. Технології обробки даних космічного моніторингу водних акваторій у<br>програмно-технологічному комплексі .....       | 85  |
| 3.2. Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація<br>аналізу акваторій моря і прибережних зон.....      | 90  |
| 3.2.1. Автоматизація дешифрування та виявлення об'єктів морської<br>інфраструктури.....                                     | 90  |
| 3.2.2. Інструменти дешифрування аерофотознімків, отриманих із безпілотних<br>літальних апаратів.....                        | 91  |
| 3.2.3. Етапи моделювання векторизації контурів виділених ділянок .....                                                      | 92  |
| 3.2.4. Фізичні принципи формування інформаційного сигналу при<br>дистанційному зондуванні морських акваторій .....          | 97  |
| 3.2.5. Формування сигналу дистанційного зондування морських вод.....                                                        | 100 |
| 3.3. Моделювання антропогенних забруднень у акваторіях Чорного та<br>Азовського морів за супутниковими знімками.....        | 102 |
| 3.3.1. Топографічна основа для картографування екологічного стану акваторій<br>.....                                        | 102 |
| 3.3.2. Ознаки дешифрування забруднень морських акваторій на знімках<br>оптичного діапазону .....                            | 104 |
| 3.3.3. Дешифрувальні ознаки для моделювання.....                                                                            | 106 |

|                                                                                                                                    |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3.4. Аналіз характерних проявів антропогенних забруднень у акваторіях Чорного та Азовського морів за супутниковими знімками..... | 109        |
| 3.4. Методика автоматизованого оконтурювання плям морських акваторій на цифрових супутникових знімках.....                         | 110        |
| 3.4.1. Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки.....                                                                        | 110        |
| 3.4. Інструменти для побудови картографічних моделей плямистості акваторій Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС .....      | 113        |
| Висновки до розділу 3. ....                                                                                                        | 118        |
| <b>РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕГРОВАНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА.....</b>                       | <b>119</b> |
| 4.1. Розроблення програмного комплексу для тематичного аналізу супутникових знімків морських акваторій,.....                       | 120        |
| 4.1.1. Розроблення векторизованих топографічних карт прибережних областей та карти глибинних ізобат морської акваторії. ....       | 120        |
| 4.1.2. Екологічна інтерпретація картографічних моделей, сформованих у результаті дешифрування супутникових знімків .....           | 121        |
| 4.1.3. Розроблення програмного комплексу для каталогізації, зберігання та пошуку космічних знімків Азовського моря .....           | 128        |
| 4.2. Автоматизоване виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерокосмічними знімками.....                | 130        |
| 4.2.1. Тестування архітектур штучного інтелекту для виділення прибережних об'єктів.....                                            | 130        |
| 4.2.2. Застосування методів оцінки точності результатів розпізнавання зображень морських акваторій та прибережних зон.....         | 132        |

|                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 4.3.Розробка інструментів розпізнання об'єктів та оптимізація обчислювальних ресурсів у задачах супутникового моніторингу морських акваторій та прибережних зон ..... | 134 |
| 4.3.1. Використання графічних процесорів.....                                                                                                                         | 134 |
| 4.3.2.Паралелізація на рівні CPU-кластерів .....                                                                                                                      | 136 |
| 4.3.3.Хмарні платформи обробки.....                                                                                                                                   | 139 |
| 4.4.Геоінформаційне картографування заповідно- рекреаційних об'єктів.....                                                                                             | 141 |
| 4.4.4. Комбіновані підходи дослідження Чорноморського регіону.....                                                                                                    | 145 |
| 4.4.5. Використання контейнеризації та оркестрації (Docker, Kubernetes):.....                                                                                         | 147 |
| 5..1. Оптимізація чинників техногенного навантаження прибережних вод.....                                                                                             | 149 |
| 5.1.1.Зменшення обчислювального навантаження за рахунок оптимізації моделей .....                                                                                     | 149 |
| 5.2. Оптимізація чинників техногенного навантаження на прибережні води ....                                                                                           | 151 |
| Висновок до розділу 4 .....                                                                                                                                           | 153 |
| ВИСНОВКИ.....                                                                                                                                                         | 155 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....                                                                                                                                       | 158 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

дистанційного зондування Землі (ДЗЗ)  
геоінформаційних систем (ГІС)  
акустичними доплерівськими профілографами течій (ADCP).  
EMM platform (Enviro-Monitoring Modules),  
БПЛА (безпілотні літальні апарати)  
Геоінформаційні технології (ГІТ)  
Convolutional Neural Networks – CNN  
EOS Data Analytics (EOSDA)  
Штучний інтелект (ШІ)  
машинне навчання (МН)  
первинних гідрооптичних характеристик (ПГХ)  
Google Earth Engine (GEE)  
NDWI (Normalized Difference Water Index),  
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)  
FUI (Floating Unnatural Index)  
Низькочастотні радіохвилі (НВЧ)  
Коефіцієнт дзеркального відбиття ( $K_{ДЗВ}$ )  
Коефіцієнт дифузного відбиття ( $K_{ДВ}$ ).  
інфрачервоного (ІЧ) випромінювання



## ВСТУП

**Актуальність теми.** Аерокосмічний моніторинг морських акваторій та прибережних зон є інструментом для вирішення екологічних, економічних і безпекових завдань. Він базується на використанні супутникових даних, дронів і літальних апаратів для отримання інформації про стан водних екосистем та антропогенний вплив.

Аерокосмічний моніторинг морських акваторій та прибережних зон є важливим інструментом для забезпечення екологічної безпеки, раціонального використання природних ресурсів та управління прибережними територіями. Використання сучасних інформаційних технологій, зокрема дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС), дозволяє оперативно отримувати та аналізувати дані про стан морського середовища на великих площах. Це сприяє ефективному виявленню та контролю забруднень, оцінці біорізноманіття, моніторингу гідрологічних процесів та прогнозуванню змін екосистем. Застосування таких технологій є особливо актуальним для України, зокрема для моніторингу екологічного стану Чорного та Азовського морів, що піддаються значному антропогенному впливу. Робота присвячена створенню та впровадженню сучасних інформаційних технологій для екологічного моніторингу прибережних вод Чорного моря, що спрямовані на підтримку управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та раціонального природокористування. Основу запропонованих рішень складають методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з космічних платформ у поєднанні з інструментами геоінформаційних систем (ГІС).

Розробка та впровадження інтегрованих інформаційних систем на основі аерокосмічних даних дозволяє підвищити ефективність управління прибережними зонами та забезпечити стале використання морських ресурсів. Здійснення дистанційних досліджень передбачає отримання та зберігання космічної інформації

в цифровій формі у вигляді архіву. Чорне море є стратегічно важливим об'єктом для України, з розвиненими транспортними зв'язками через порти Одеси, Іллічівська, Південного, Миколаєва та Херсона. Його узбережжя має значний рекреаційний потенціал, а води багаті на морепродукти, сировину для хімічної промисловості, будівельні матеріали та корисні копалини, що підкреслює важливу геополітичну роль України.

Однак, з початком російської військової агресії, екологічний стан Чорного моря та прилеглих регіонів зазнав значного погіршення. Військові дії призводять до забруднення моря токсичними речовинами від затопленої техніки та зруйнованої інфраструктури, що негативно впливає на морські екосистеми та прибережні території.

Крім того, російські військові кораблі, здійснюючи пуски ракет та маневри, завдають додаткових екологічних збитків, порушуючи баланс підводних екосистем. За оцінками Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, сума збитків, завданих Чорному морю, становить 345 мільйонів євро.

Військові дії також впливають на об'єкти природно-заповідного фонду, призводячи до забруднення моря токсичними речовинами та стресу для морських тварин. Зокрема, після російського вторгнення зафіксовано масову загибель дельфінів у Чорному морі.

Розуміючи необхідність спільних зусиль для збереження Чорного моря, країни Чорноморського басейну підписали Конвенцію про захист Чорного моря від забруднення (1992, Бухарест, Румунія). У розвиток положень Конвенції, 22 березня 2001 року Верховна Рада України прийняла державну "Програму охорони та відтворення довкілля Чорного моря". Для ефективної реалізації цієї програми та виконання міжнародних зобов'язань України необхідно впровадити сучасну систему моніторингу територіальних вод та виключної економічної зони України в Чорному морі, а також контролювати антропогенні чинники впливу на них.

Елементи такої системи, що підтримують прийняття рішень щодо виконання

положень Конвенції, функціонують в рамках "Порядку державного моніторингу вод", затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 20 липня 1996 р. № 815. Її ефективність можна підвищити за рахунок використання результатів тематичного дешифрування космічних знімків, які надаються у формі геомodelей з атрибутивними даними

Для ефективного моніторингу української частини Азовського моря створено архів космічних знімків, отриманих з різних супутників, таких як NOAA, TERRA, SPOT, LANDSAT та QuickBird. Ці супутники забезпечують оптимальні характеристики просторової роздільної здатності та частоти повторної зйомки, що є критично важливим для спостереження за динамічними процесами в морських акваторіях та прибережних зонах. Архів матеріалів ДЗЗ являє собою інформаційний базис створення карт про стан поверхневих вод України.

**Актуальність теми** обумовлена вимогами перспективних теоретичних та прикладних досліджень в створенні нових та удосконаленні існуючих алгоритмів аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон.

Розв'язання поставленого наукового завдання дозволяє підвищити достовірність та інформаційні можливості систем аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних територій для визначення зон ризику на основі використання мобільних аерокосмічних комплексів.

**Об'єктом дослідження** є процеси підтримки прийняття рішень при створенні нових та удосконаленні існуючих алгоритмів аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон для автоматизованого пошуку об'єктів на аерокосмічних знімках.

**Предметом дослідження** є моделі та засоби побудови інформаційної технології підтримки прийняття рішень при створенні нових та удосконаленні існуючих алгоритмів аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон для автоматизованого пошуку об'єктів на аерокосмічних знімках.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

– розробити концептуальну модель інтегрованого управління екологічною безпекою морських акваторій із використанням інформаційних технологій для поєднання цифрових платформ моніторингу, правового регулювання та систем адаптивного управління у Чорному та Азовському морях;

– побудувати інформаційно-керовану систему колективного управління безпілотними літальними апаратами з динамічним коригуванням маршруту польоту в морському середовищі на основі просторових даних, що надходять у реальному часі;

– розробити методику автоматизованого дешифрування супутникових знімків Чорного та Азовського морів із застосуванням інформаційних технологій комп'ютерного зору та глибокого навчання для розпізнавання забруднень і екологічних аномалій;

– запропонувати архітектурно-функціональну модель гібридного моніторингу морського середовища, що базується на інфраструктурі високопродуктивних обчислень, хмарних сервісах, аналітичних алгоритмах та інструментах інтелектуальної обробки екологічних даних;

– удосконалити інформаційні технології групового моніторингу морських акваторій за допомогою БПЛА через інтеграцію алгоритмів формування цифрових зображень зон забруднення в умовах кризових подій;

- розвинути просторово-часову модель екологічного моніторингу Чорного моря на основі геоінформаційних технологій, що забезпечують автоматизовану візуалізацію, аналіз і прогнозування стану морських екосистем.

**Методом проведення** дослідження є — аналіз основних вимог до процедури візуального дешифрування; математичне моделювання та аналіз алгоритмів для автоматизованого пошуку об'єктів на аерокосмічних знімках та інші.

Інформаційні технології аерокосмічного моніторингу здійснюють ключову роль у підтримці сталого розвитку та екологічної безпеки прибережних зон і

морських акваторій. Завдяки постійному розвитку прогресивних і безпілотних систем цей напрямок стає інструментом для ефективного управління водними ресурсами, прогнозування стихійних лих та мінімізації наслідків антропогенних впливів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт на базі Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України та реалізовані у тематиках: «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоекосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216), «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження нестаціонарних процесів.» (№ РК 0116U000793 державної реєстрації) «Розробка інформаційної технології моделювання і прогнозування розвитку соціально-еколого-економічних систем в умовах невизначеності, нестаціонарності та ризику» (№ ДР 0121U100132).

«Розробка та аналіз засобів теоретико-ігрового моделювання стратегій збалансованого технологічного розвитку територій» (№ РК 0116U000796 державної реєстрації); в межах науково-дослідної роботи «Дослідження асиміляційного потенціалу поверхневих вод, геологічного середовища та приземної атмосфери в умовах техногенезу» (№ ДР 0113U004982)., Закону України «Про основні засади (стратегію) державної економічної політики України на період до 2030 р.», програми Європейської «Зеленої угоди».

У результаті системного аналізу стану розвитку ДЗЗ/ГІС-технологій було ідентифіковано структуру інформаційних ресурсів, необхідних для моніторингу прибережної зони Чорного моря, сформовано спеціалізовану базу космічних знімків, а також запропоновано новий підхід до підвищення ефективності спостереження за екологічним станом моря. Визначено ключові ознаки, за якими ідентифікуються різні типи забруднень, та розроблено методику автоматизованого

відтворення просторово-часових змін плямистості водної поверхні на основі супутникових даних, враховуючи гідродинамічні, гідрооптичні та гідробіологічні характеристики.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

– *Вперше* запропоновано концептуальну модель інтегрованого управління екологічною безпекою морських акваторій Чорного й Азовського морів, що базується на застосуванні інформаційних технологій: цифрових платформ моніторингу, інструментів правового регулювання та адаптивного управління в умовах трансформації прибережного середовища.

– *Вперше* розроблено інформаційну систему колективного управління безпілотними літальними апаратами для екологічного моніторингу морських акваторій, яка забезпечує стабілізацію кутових координат, оптимізацію траєкторій польоту та адаптивне коригування плану руху з урахуванням просторових особливостей середовища.

– *Вперше* створено методику автоматизованого дешифрування супутникових знімків Чорного та Азовського морів з використанням інформаційних технологій глибокого навчання (YOLOv5, U-Net, DeepLabv3+), що забезпечує точну ідентифікацію забруднень, змін берегової лінії та класифікацію техногенних впливів у морському середовищі.

– *Вперше* реалізовано архітектурно-функціональну модель гібридного екологічного моніторингу морського середовища Чорного та Азовського морів на основі сучасних інформаційних технологій — GPU/CPU-обчислень, хмарних сервісів, нейромережевого аналізу та каталогізації супутникових даних, що забезпечує формування багатошарових екологічних картограм у режимі реального часу.

– *Удосконалено* просторово-часову модель екологічного моніторингу Чорного моря з використанням геоінформаційних систем, цифрових аналітичних

інструментів і даних вертикального зондування для автоматизованої візуалізації екологічних змін, виявлення порушень та прогнозування динаміки морських екосистем..

– *Набули подальшого розвитку* інформаційні технології групового моніторингу морських акваторій із використанням безпілотних літальних апаратів у динамічному середовищі, що включають алгоритми цифрової реконструкції зон забруднення, спричинених воєнними діями та аваріями на критичних об'єктах інфраструктури.

**Практичне значення одержаних результатів.** Практичне значення одержаних результатів полягає у створенні цілісної інформаційної системи інтегрованого моніторингу морських акваторій та прибережних зон Чорного й Азовського морів, орієнтованої на виявлення забруднень, спричинених воєнними діями, аварійними викидами та пошкодженням об'єктів критичної інфраструктури. Розроблені моделі, алгоритми та методики можуть бути впроваджені в програмне забезпечення для обробки супутникових знімків і даних з фізико-хімічних сенсорів, а також у системи навігації та керування групами безпілотних літальних апаратів. Запропоновані алгоритми обробки інформації, зокрема на основі нейронних мереж (YOLOv5, U-Net, DeepLabv3+), забезпечують автоматичну ідентифікацію плям забруднення, класифікацію екологічних аномалій, моніторинг змін берегової лінії та формування багат шарових екологічних картограм. Методика стабілізації маршруту БПЛА із застосуванням векторної графіки та кривих Безьє дозволяє оптимізувати польотні траєкторії за обмеженої кількості контрольних точок, що важливо для задач оперативного реагування в складних просторово-часових умовах.

Особливої прикладної цінності набуває запропонований метод обробки інформації при керуванні БПЛА з використанням нейромережевої комунікації, що забезпечує надійну двосторонню передачу даних між бортовими системами та

оператором у реальному часі, з урахуванням змін метеоумов і тактичної обстановки.

Впровадження результатів дисертаційної роботи дозволяє:

- Підвищити точність, достовірність та оперативність отримання інформації про забруднення морських акваторій та прилеглих зон за рахунок використання гібридної архітектури моніторингу, адаптованої до кризових ситуацій;
- Оптимізувати групову роботу БПЛА в режимі моніторингу, базуючись на апріорній інформації про осередки впливу та просторові особливості морського середовища;
- Підсилити можливості розрахунково-аналітичних центрів Збройних Сил України щодо збору, візуалізації, обробки та прогнозування оперативної та екологічної обстановки (див. Додатки А, Б).

Результати дисертації вже застосовуються під час навчання та підготовки фахівців у структурах «Командування Сил Підтримки Збройних Сил України» та можуть бути інтегровані у практику екологічного та стратегічного моніторингу в межах інформаційно-аналітичних центрів сектору оборони і безпеки.

**Апробація матеріалів дисертації.** Одержані результати дисертаційної роботи були представлені та обговорені на міжнародних конференціях: XXI, XXII, XXIII Міжнародна науково-практична конференція Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ (м. Київ, Україна, 2022,2023,2024); . Міжнародній науково-практичній конференції: НУХТ, 6 – 7 листопада 2024р. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення Україниє. (Київ, Україна); IX Міжнародній науково-практичній конференції. 7-11 жовтня 2024 р., м. Львів. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Державна комісія України по запасах корисних копалин; «IX Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024;



Міжнародній науково-практичній конференції. Challenges and threats to critical infrastructure. Detroit (Michigan, USA) – 2023p; Міжнародній науково-практичній конференції "Сучасні аспекти діджиталізації та інформатизації в програмній та комп'ютерній інженерії"(01-03 червня 2023) Державний університет телекомунікацій. Інститут інформаційних технологій. - 2023p; XXVIII-Міжнародній науково-практичній конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 15 наукових робіт. З них 4– у наукових фахових виданнях, 1 стаття у міжнародних виданнях (Scopus), 10 тез доповідей у міжнародних наукових конференціях.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, додатків; містить 23 рисунків і 8 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 175 сторінок, серед яких 156 сторінок основного тексту.

## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧОГО СТАНУ МЕТОДИК ОБРОБКИ АЕРОКОСМІЧНИХ ЗНІМКІВ ТА ЗАСОБІВ МОНІТОРИНГУ АКВАТОРІЙ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ ТЕРИТОРІЙ**

У розділі представлено комплексний аналіз нормативної бази, інституційних структур та методології організації системи державного водного моніторингу, з акцентом на морські акваторії та прибережні зони Чорного моря. Розглянуто категорії пунктів спостереження, класифікацію моніторингу (фоновий, загальний, кризовий), технічні особливості вертикального зондування, групи контрольованих речовин, а також роль ключових державних установ у реалізації екологічного нагляду за морським середовищем.

Наукометричний та бібліографічний аналіз свідчить про те, що аерокосмічний моніторинг є невід'ємною складовою сучасних екологічних досліджень, особливо у контексті морських акваторій та прибережних зон. Інтеграція цих технологій з іншими інформаційними системами відкриває нові можливості для ефективного управління природними ресурсами та забезпечення екологічної безпеки.

### **1.1. Інформаційне, нормативно-правове забезпечення та організація державного моніторингу морських вод України**

#### **1.1.1. Інструментальні засоби для моніторингу морських акваторій та прибережних зон**

Інструментальні засоби для моніторингу морських акваторій та прибережних зон становлять комплекс технічних, програмних та аналітичних рішень, спрямованих на забезпечення ефективного спостереження, аналізу та прогнозування стану морського середовища. Їх використання в Україні є невід'ємною частиною системи екологічного моніторингу, що регулюється рядом національних нормативно-правових актів і відповідає міжнародним стандартам у

сфері охорони навколишнього середовища.

Основу нормативного забезпечення становить Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" (від 25.06.1991 № 1264-XII), який визначає загальні принципи екологічного моніторингу та передбачає необхідність контролю за станом природного середовища, у тому числі морських вод. Окрему увагу приділено вимогам щодо впровадження науково обґрунтованих методів спостережень та застосування сучасних технологій. Також важливу роль відіграє Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» (№ 2697-VIII). Закон України «Про національну безпеку України». Закон України "Про охорону атмосферного повітря" (від 16.10.1992 № 2707-XII) та Закон України "Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення" (№ 4004-XII від 24.02.1994), що регулюють частину гігієнічного та хімічного контролю за якістю води в зонах рекреації [11-7.].

У межах євроінтеграційних процесів Україна також імплементує положення Рамкової директиви ЄС про морську стратегію (2008/56/ЄС), яка передбачає застосування інтегрованих інструментальних систем для оцінки "доброго екологічного статусу" (Good Environmental Status) морських вод. Вона зобов'язує держави-учасниці впроваджувати технології моніторингу на основі найкращих доступних методів, зокрема супутникових та автоматизованих засобів [8-11.].

Серед інструментальних засобів, що застосовуються в Україні та світі для моніторингу морських акваторій, виділяють кілька ключових категорій:

Супутникові платформи та системи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) – включають сервіси Sentinel (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3), Landsat-8/9, MODIS (Terra/Aqua), які дозволяють проводити регулярне спостереження за температурними аномаліями, цвітінням водоростей, нафтовими плямами, змінами берегової лінії, ступенем прозорості та іншими екологічними показниками. Дані супутників опрацьовуються в програмних середовищах QGIS, ArcGIS, ENVI, SNAP (ESA), Google Earth Engine.

БПЛА (безпілотні літальні апарати) з мультиспектральними або тепловізійними камерами – забезпечують високоточне зондування малих ділянок узбережжя або акваторій з роздільною здатністю до кількох сантиметрів на піксель. Використовуються для локального моніторингу берегової ерозії, незаконного будівництва, забруднення або замулення. Гідрологічні сенсорні платформи – автономні буї, які обладнані датчиками солоності, температури, кисню, рН, хлорофілу, турбідності, а також акустичними доплерівськими профілографами течій (ADCP). Такі платформи можуть передавати дані у реальному часі через супутниковий зв'язок. Серед прикладів – буї SeaGuard, EMM platform (Environmental Monitoring Modules), продукти компаній YSI, RBR, OTT.

Стаціонарні берегові станції моніторингу – оснащені метеостанціями, системами забору проб, автоматичними спектрофотометричними або лазерними системами аналізу. Здійснюють контроль за якістю води в реальному часі в ключових точках впливу (порти, зони відпочинку, гирла річок) та регламентуються Кодексами [12-14.]

Системи гідроакустичного зондування та батиметрії – застосовуються для дослідження дна, картування мулових накопичень, донного сміття та підводних джерел забруднення. Сюди належать ехолоти, сонари та багатопроменеві сканери (Multibeam Echo Sounders, Side-scan sonars), які інтегруються з GPS/GNSS-модулями [15]

Програмні комплекси управління екологічним моніторингом – включають платформи на базі ГІС для зберігання, обробки, візуалізації та аналітики даних (QGIS, ArcGIS Online, GeoServer, PostgreSQL/PostGIS). В останні роки популярності набувають хмарні інструменти (Google Earth Engine, Microsoft Azure, AWS для екологічної аналітики), що забезпечують паралельну обробку великих масивів супутникових знімків та спрощують інтеграцію із сенсорними мережами.

Крім того, впроваджується Інтегрована автоматизована система екологічного моніторингу відповідно до положень Концепції розвитку системи моніторингу

довкілля в Україні (затверджена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2017 р. № 1020-р), яка передбачає цифрову трансформацію екологічного контролю та впровадження багаторівневого моніторингу за європейськими зразками[16].

На міжнародному рівні Україна бере участь у проєктах EMODnet (European Marine Observation and Data Network), Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), де використовуються уніфіковані інструментальні підходи та протоколи моніторингу.(рис.1.1.)

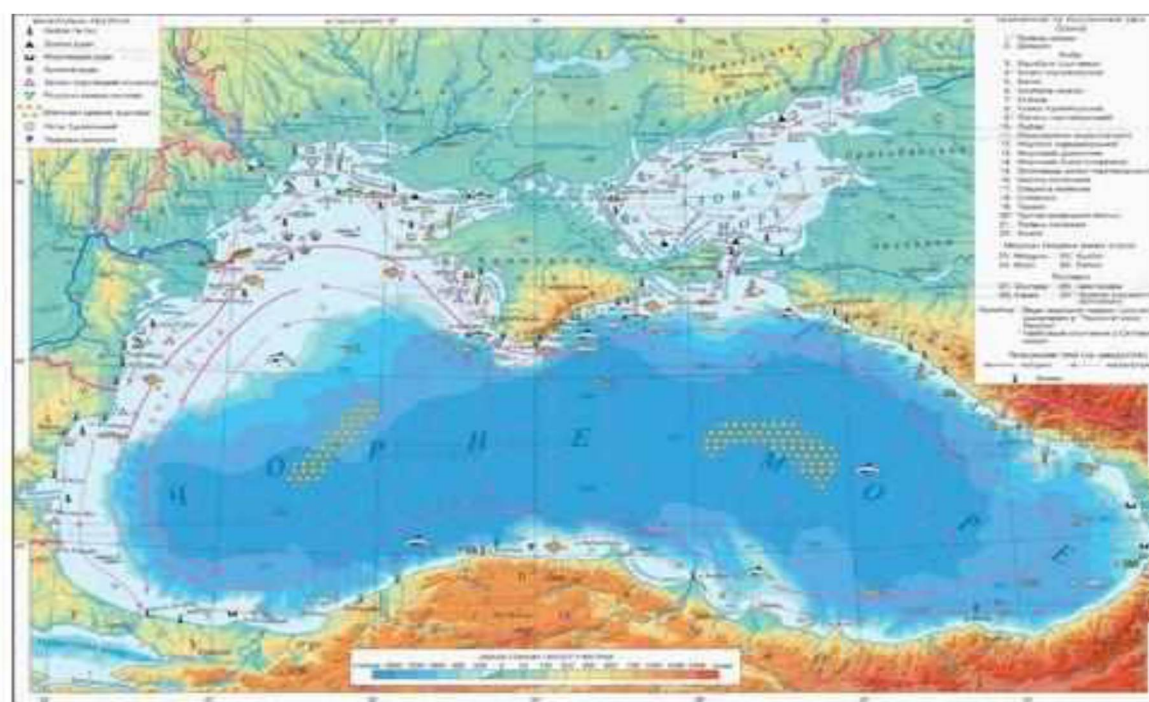


Рис.1.1.Оглядова карта морських акваторій та прибережних зон

Таким чином, ефективність інструментального моніторингу морських акваторій залежить від синергії між технічними засобами, нормативно-правовим забезпеченням, кваліфікованим персоналом і можливостями обробки великих обсягів даних. Розбудова такої системи дозволяє Україні виконувати міжнародні

зобов'язання, оперативно реагувати на екологічні загрози та забезпечувати сталий розвиток чорноморського регіону.

### **1.1.2. Наукометричний та бібліографічний аналіз джерел щодо використання аерокосмічного моніторингу в екологічних дослідженнях**

Наукометричний та бібліографічний аналіз аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон є важливим аналітичним інструментом, який дозволяє оцінити еволюцію наукових досліджень, інтенсивність публікаційної активності, географію дослідницьких центрів, домінуючі тематичні напрями, ключові технології та структуру наукових співпраць. У контексті глобального потепління, зростання антропогенного тиску на прибережні території та актуальності задач сталого управління морськими ресурсами, цей напрям досліджень демонструє стійке зростання інтересу в міжнародному науковому середовищі[16,17].

За результатами аналізу баз даних Scopus, Web of Science, Google Scholar та національних реєстрів (зокрема, наукових публікацій України), встановлено, що в період з 2000 по 2024 рік кількість наукових публікацій, присвячених аерокосмічному моніторингу акваторій, зросла в кілька разів, що свідчить про зростаючу роль дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та геоінформаційних систем (ГІС) у вирішенні морських і прибережних екологічних проблем[18-25]. Найбільшу кількість публікацій зосереджено в журналах Remote Sensing, Marine Pollution Bulletin, International Journal of Remote Sensing, Ocean & Coastal Management, Environmental Monitoring and Assessment, а також у профільних збірниках міжнародних конференцій (IGARSS, SPIE, IEEE Oceans) [17, 18, 19].

Тематику публікацій можна умовно поділити на кілька основних напрямів: (1) автоматизоване виявлення забруднень (нафтові плями, цвітіння водоростей, підвищення мутності); (2) зміна берегової лінії, ерозійні процеси, просторовий аналіз затоплень; (3) моніторинг біологічного різноманіття, оцінка стану морських

екосистем; (4) супутникове картографування температурних полів і параметрів морської поверхні; (5) використання штучного інтелекту, глибинного навчання (Deep Learning) та методів обробки великих даних у ДЗЗ морських регіонів.

Найбільш цитовані праці зосереджені навколо розробки алгоритмів класифікації морських об'єктів за супутниковими знімками, зокрема з використанням платформ Sentinel-1, Sentinel-2, MODIS, Landsat-8/9. Особливу увагу приділяють дослідженням з застосуванням SAR-даних (Synthetic Aperture Radar) для виявлення нафтових викидів, які дозволяють здійснювати моніторинг у нічний час і за хмарного покриття[20-23].. Зростає також кількість досліджень з використанням Google Earth Engine, SNAP (ESA), QGIS, ArcGIS Pro для обробки великих масивів зображень, що свідчить про поширення хмарних обчислень та відкритих інструментів аналізу[24,25].

З географічної точки зору, провідними країнами у публікаційній активності є США, Китай, Італія, Франція, Німеччина, а також Іспанія. Україна демонструє зростання наукової активності у цій сфері, зокрема в дослідженнях Чорного й Азовського морів, зосереджуючись на оцінці екологічних ризиків, техногенного забруднення та впливу воєнних дій на прибережні території. Серед установ-лідерів варто відзначити Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Одеський екологічний університет, Інститут морської біології НАН України, а також Центр ДЗЗ "Іоносфера" ДКАУ[27].

Бібліографічний аналіз показує, що в останні роки спостерігається тенденція до мультидисциплінарності: в роботах поєднуються екологія, гідрологія, інформатика, штучний інтелект, географія та інженерні науки. Часто статті мають високий рівень співавторства між міжнародними дослідницькими групами, що сприяє обміну даними, технічними стандартами й спільному аналізу екосистемних змін на глобальному рівні[28-30].

У результаті проведеного аналізу можна зробити висновок, що аерокосмічний моніторинг морських акваторій та прибережних зон є динамічно розвиваючою

галуззю, яка активно впроваджує інноваційні інформаційні технології, зокрема штучний інтелект, хмарні обчислення, паралельну обробку даних і глибоке навчання. Подальше зростання якості досліджень значною мірою залежить від розвитку відкритих супутникових архівів, міжнародних проєктів обміну даними та державної підтримки наукових програм у сфері екологічної безпеки морських територій.

У сучасному світі аерокосмічні технології відіграють ключову роль у системах екологічного моніторингу, особливо в контексті спостереження за морськими акваторіями та прибережними зонами. Це зумовлено їхньою здатністю забезпечувати оперативне, масштабне та високоточне збирання даних про стан навколишнього середовища. Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючий інтерес до інтеграції аерокосмічних технологій з геоінформаційними системами (ГІС) для створення комплексних систем моніторингу. Це дозволяє не лише фіксувати поточний стан екосистем, але й прогнозувати їхні зміни, що є надзвичайно важливим для прийняття ефективних управлінських рішень у сфері охорони навколишнього середовища.

Визначальне місце у розвитку технологій супутникового моніторингу займала праця вчених із Морського гідрофізичного інституту НАН України — В. Н. Єремєєва, Г. К. Коротаєва та Л. Н. Радєйкіної. Вони створили систему моніторингу динаміки Чорного моря за допомогою технологій TOPEX/POSEIDON — з об'єднанням супутникових даних та моделей загальної циркуляції моря. Результати показали високу точність відтворення гідродинамічних процесів [31].

Сергій Щербак, Олена Лаврова, Марія Митягіна, Тетяна Бочарова, В.А. Кровотинцев та А.Г. Островський у дослідженні використали мультисенсорні супутникові дані для оцінки стану поверхні Чорного моря. Їхній підхід включав аналіз спектральних характеристик водних мас та поєднання оптичних і радіолокаційних (SAR) сигналів [32].



У рамках масштабного міжнародного проєкту EMBLAS, підтриманого Європейською комісією та ПРООН, група науковців (включно з українськими дослідниками) реалізовувала комплексний екологічний моніторинг Чорного моря — відповідно до вимог Рамкової директиви ЄС. Включено розробку процедур збору даних, систем їх обробки й інтерпретації результатів для управлінських рішень у сфері екологічної безпеки [33].

Серед науковців Української академії наук важливий внесок зробив Віктор Єгоров — академік і фахівець із радіоекології моря. Він досліджував метанові газові викиди з дна Чорного моря, міграцію радіонуклідів після Чорнобильської аварії та розробив методики нормування антропогенного забруднення водою з використанням біогеохімічних критеріїв. Його монографії й публікації стали фундаментом для оцінювання екологічного стану акваторій України [34].

Іншим цікавим прикладом стала робота колективу Б. Цибенка, Т. Малик, Д. Ляшенка тощо (Тараса Шевченка НУ, Київ), представлений на міжнародній конференції у квітні 2025 року. Вони провели аналіз супутникових даних Sentinel-1 для виявлення гідрокарбонового забруднення Чорного й Азовського морів, зокрема — і моделювання наслідків аварійного викиду біопалива біля Керченської протоки у грудні 2024 року [17, 18, 19]. Крім того, в міжнародних дослідженнях є цікавий кейс: комбіновані моделі, що поєднують оптичні і in-situ дані для об'єктів узбережжя Чорного моря у Болгарії. Вони показали, що гібридний підхід значно збагачує аналітичну інформацію про стан узбережжя [35].

Загалом ці роботи формують фундамент: адже моніторинг морських середовищ здобуває статус міждисциплінарної практики, що поєднує ГІС, ДЗЗ, моделі циркуляції, гідрохімію та екологічні сенсори. В Україні цей напрям активно розвивається: від експедиційних спостережень (наприклад «Чорне море – 2019») до створення флоту дослідницьких ресурсів, як-от судно «Борис Александров», що вже збирає дані по забрудненню, біорізноманіттю та генам резистентності океанічної мікрофлори [36].

### **1.1.3. Законодавчі засади та організація державного моніторингу морських вод України**

Законодавча та нормативна база, що регламентує здійснення державного моніторингу морських вод України, ґрунтується на положеннях Водного кодексу України, Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», а також відповідних постанов Кабінету Міністрів України, які визначають порядок проведення екологічного моніторингу водних об'єктів, включаючи морські акваторії. Відповідно до статті 21 Водного кодексу України, державний моніторинг вод є складовою частиною загальнодержавної системи моніторингу довкілля та спрямований на збір, зберігання, обробку та аналіз даних щодо стану водного середовища для прийняття управлінських рішень щодо його охорони, раціонального використання та відтворення водних ресурсів.

Ключовим нормативним документом є Постанова Кабінету Міністрів України № 827 від 19 вересня 2018 року, якою затверджено Порядок здійснення державного моніторингу вод. Цей документ деталізує організаційні, технічні та методологічні основи функціонування системи моніторингу, визначає об'єкти спостереження, джерела потенційного забруднення, методи збору даних та процедури їх оцінки. Згідно з Порядком, моніторинг охоплює не лише внутрішні морські води та територіальне море, а й виняткову економічну зону України в межах морських акваторій[11-7.]..

Організація державного моніторингу передбачає ієрархічну структуру спостережних пунктів, що поділяються на три основні категорії: пункти прибережного контролю, сезонні й довгострокові пункти відкритого моря та кризові пункти екологічного ризику. Пункти першої категорії розташовуються у зонах рекреації, поблизу портів, гирл річок, місць скиду стічних вод і видобутку корисних копалин. Друга категорія охоплює простори відкритого моря та призначена для вивчення сезонної та міжрічної динаміки забруднення. Третя

категорія формується в разі надзвичайних ситуацій, техногенних аварій або зафіксованих фактів забруднення, що потребують оперативного реагування.

Моніторинг реалізується за участі органів виконавчої влади, зокрема: Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України, Державного агентства водних ресурсів України, Державної екологічної інспекції, а також науково-дослідних установ та регіональних лабораторій моніторингу водного середовища. У межах реалізації функцій державного нагляду та екологічного контролю ці установи проводять відбір проб, здійснюють хімічні, фізико-хімічні, біологічні та гідрологічні вимірювання, з урахуванням класифікації показників згідно з європейськими стандартами якості вод (Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС).

Законодавча база також враховує сучасні технологічні підходи до моніторингу. Зокрема, в останні роки на нормативному рівні закріплено використання технологій дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, супутникових даних та автоматизованих систем збору даних із морських платформ, буїв та датчиків Internet of Things (IoT). У контексті інтеграції України до європейського екологічного простору, відбувається гармонізація національної системи моніторингу з вимогами Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) та Європейської агенції з навколишнього середовища (EEA). Таким чином, законодавчі засади державного моніторингу морських вод України формують цілісну систему регуляторних та інституційних механізмів, що забезпечують екологічну безпеку морських акваторій. У поєднанні з інноваційними технологіями спостереження, ці механізми дають змогу своєчасно виявляти екологічні загрози, аналізувати динаміку антропогенного впливу та розробляти ефективні заходи з охорони морського середовища.

## **1.2. Концептуальні підходи до тематичних завдань супутникового моніторингу акваторії Чорного моря**

Екосистеми прибережних регіонів є надзвичайно вразливими до впливу як техногенних, так і природних процесів. Для ефективного управління збалансованим розвитком узбережжя та морських акваторій вкрай важливо мати системно структуровану, багаторівневу інформацію про динаміку соціально-економічних, екологічних і природних явищ, що там відбуваються. Прогрес у галузі космічних досліджень створив передумови для комплексного спостереження за взаємодією елементів природного середовища — суші, океану та атмосфери — за допомогою супутникових технологій, що забезпечують моніторинг, оцінку стану та прогноз змін під дією зовнішніх чинників [37].

Технології дистанційного зондування Землі з орбіти надають можливість отримувати інформацію глобального масштабу з високими просторовими та часовими характеристиками. Дані супутникових зйомок містять відомості про фізичні, хімічні, біологічні та морфометричні параметри об'єктів спостереження, що інтерпретуються на основі залежностей між характеристиками випромінювання й властивостями середовища.

Упродовж останніх років спостерігається динамічний розвиток аерокосмічних технологій, що використовуються для спостереження за станом морських вод. Їх практична цінність полягає у здатності сучасних сенсорів фіксувати широкий спектр важливих екологічних параметрів, зокрема:

- оптико-гідрологічні характеристики, що змінюються внаслідок коливань коефіцієнтів поглинання й розсіювання світла, викликаних варіаціями у вмісті завислих речовин або присутністю поверхневих плівок (наприклад, нафтових);
- температурні властивості водного середовища, особливо у зонах апвелінгу, внутрішніх хвиль, течій і турбулентних зон;
- електропровідність, що визначає рівень солоності.

Прикладом застосування таких технологій є створення карт просторового розподілу хлорофілу та температури морської поверхні в Чорному та Азовському морях, які були побудовані на основі обробки даних багатозонального сенсора MODIS супутників TERRA й AQUA з просторовою роздільністю від 250 м до 1 км у різних спектральних діапазонах. На супутникових зображеннях часто можна візуально зафіксувати ділянки, де у воді присутні речовини теригенного походження або сліди нафтового забруднення[38]. . Практика застосування супутникового моніторингу як в Україні, так і за кордоном, підтверджує його високу ефективність для вирішення широкого кола задач:

- детальне картування морського дна на мілководдях та вивчення топографії поверхні моря;
- оцінка швидкості й напрямку течій, а також переміщень уздовж берегової лінії;
- визначення температурних характеристик поверхні моря;
- аналіз параметрів хвильових процесів: висоти та напрямку руху;
- фіксація змін рівня моря;
- спостереження за рівнем солоності вод;
- екологічний моніторинг прибережних зон, що зазнають впливу промислових об'єктів;
- виявлення зон локального забруднення (наприклад, розливи, аварійні скиди), визначення джерел і моделювання їх поширення;
- фіксація забруднень, спричинених нафтопродуктами;
- моделювання динаміки фітопланктону у просторі та часі;
- ідентифікація фактів самочинної забудови у водоохоронних зонах та гирлах річок.

Виконання цих завдань дозволяє забезпечити установи державного моніторингу та користувачів морських ресурсів достовірною та актуальною

інформацією щодо акваторій України в межах її територіального моря, шельфу та виняткової економічної зони.

Отримані дані мають практичне значення для:

- раціонального використання морських ресурсів з дотриманням екологічних нормативів;
  - перевірки дотримання встановлених квот на використання ресурсів і гранично допустимих норм скидів забруднювальних речовин;
  - забезпечення екологічного нагляду при поводженні з токсичними, небезпечними та радіоактивними речовинами, у тому числі при їх транспортуванні, зберіганні, утилізації;
  - екологічного супроводу планування, будівництва й функціонування підприємств та інших об'єктів;
  - контролю за операціями з відходами: перевезення, обробка, захоронення;
  - спостереження за процесами видобування природних ресурсів, включаючи буріння, вибухові й днопоглиблювальні роботи;
  - недопущення виснаження біоресурсів і зменшення біорізноманіття;
- дотримання вимог екологічної безпеки під час науково-дослідної, дослідно-конструкторської діяльності, реалізації інфраструктурних проектів та впровадження нових технологій.

Крім того, результати тематичного дешифрування знімків можуть бути використані для:

- оцінки збитків у разі екологічних порушень;
- розроблення планів щодо усунення негативних наслідків забруднення;
- моніторингу переміщення забруднюючих агентів і контролю за ефективністю ліквідаційних заходів;
- супроводу екологічної експертизи проєктної документації на об'єкти портової інфраструктури, у тому числі при проведенні днопоглиблювальних робіт

і поводженні з відходами.

### **1.3. Сучасні супутникові платформи для моніторингу прибережних зон та морських акваторій**

#### **1.3.1. Екосистема супутникового моніторингу морських акваторій**

Ефективний моніторинг прибережних зон та морських акваторій неможливий без використання супутникових технологій, які забезпечують регулярне, багатоаспектне спостереження за об'єктами з великою територіальною протяжністю[38].. Космічні апарати, що здійснюють дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), виступають основним джерелом високоточної інформації для систем екологічного моніторингу. Сучасні супутникові платформи дозволяють отримувати дані у різних спектральних діапазонах (VNIR, SWIR, TIR, радіолокаційний), з просторовою роздільною здатністю від надвисокої (менше 1 м) до низької (500–1000 м), що відкриває широкі можливості для аналізу різних природно-техногенних процесів у прибережних регіонах(рис.1.2.)

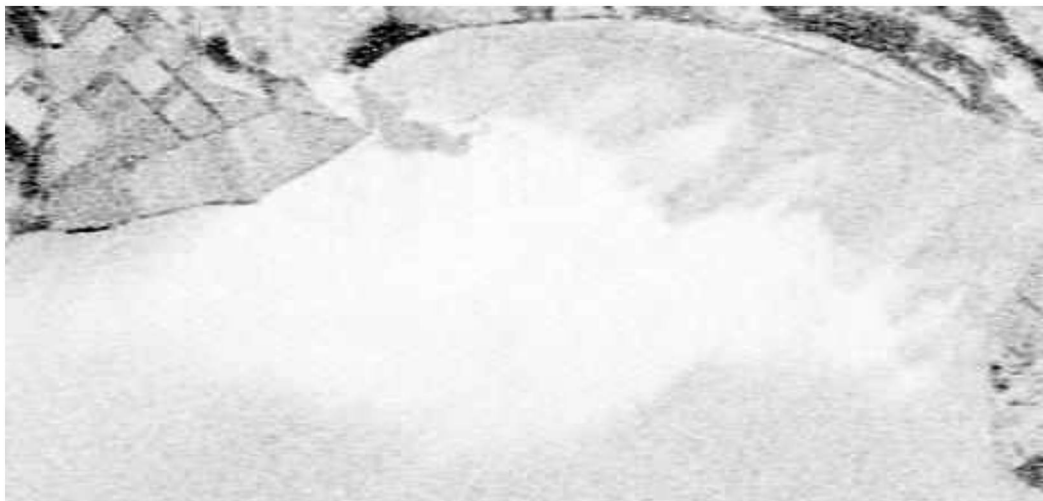


Рис.1.2. Вихідний знімок

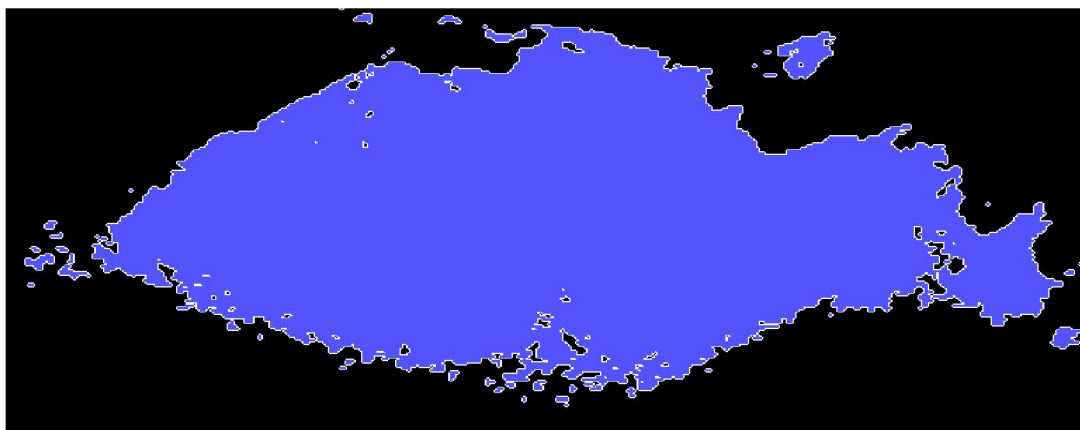


Рис.1.3 векторизована його ділянка

| Платформа          | Просторова роздільна здатність | Частота зйомки | Застосування                                        |
|--------------------|--------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------|
| Landsat            | 30 м                           | 16 днів        | Довгостроковий моніторинг, екологічне дослідження   |
| Sentinel-2         | 10–60 м                        | 5 днів         | Моніторинг рослинності, водних ресурсів             |
| Terra ASTER        | 15–90 м                        | 16 днів        | Геологічні дослідження, виявлення теплових аномалій |
| MODIS (Terra/Aqua) | 250–1000 м                     | 1–2 дні        | Глобальний моніторинг, кліматичні дослідження       |

### 1.3.2. Візуалізація траєкторії супутників та планування зйомки

Окрему увагу в межах інформаційних технологій заслуговують сервіси для прогнозування положення супутників. Інтерактивні платформи, як-от ESA's Orbit Viewer або програма Orbitron, дозволяють в реальному часі відслідковувати орбіти, симулювати шляхи пролітів, задавати координати зйомки і здійснювати попереднє планування моніторингу. Визначення часу проліту супутника над цільовим регіоном дозволяє ефективно інтегрувати процес замовлення знімків у загальну інформаційно-аналітичну систему[39].

Застосування ІТ-технологій у супроводі супутникових даних дозволяє:

- автоматизувати розклад зйомки в рамках геоінформаційних систем;



- інтегрувати отримані зображення у моделі моніторингу екологічного стану водойм;

- використовувати алгоритми штучного інтелекту для автоматичного розпізнавання об'єктів, зміни берегової лінії, розливів нафтопродуктів або зон евтрофікації.

#### **1.4. Геоінформаційні технології екологічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон**

##### **1.4.1. Дослідження у сфері екологічної безпеки з використанням інформаційних технологій**

Геоінформаційні технології (ГІТ) відіграють ключову роль у сучасному екологічному моніторингу морських акваторій та прибережних зон України, зокрема Чорного та Азовського морів. Їх застосування забезпечує оперативне отримання, обробку та аналіз великого обсягу просторових даних, що є критично важливим для оцінки екологічного стану, виявлення забруднень, прогнозування надзвичайних ситуацій та підтримки прийняття управлінських рішень.

Сучасні системи моніторингу базуються на інтеграції даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) із супутників, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) та наземних спостережень[39].. Наприклад, використання супутників Sentinel програми Copernicus дозволяє отримувати багатоспектральні знімки високої роздільної здатності, які є основою для виявлення змін у морських екосистемах, таких як цвітіння водоростей, розливи нафти та інші форми забруднення .

ГІТ дозволяють створювати інтерактивні картографічні моделі, які детально відображають просторовий розподіл об'єктів і встановлені між ними зв'язки на базі даних, отриманих ефективними методами моніторингу. Це включає інформацію про техніко-економічні характеристики об'єктів, що є важливим для планування заходів з охорони навколишнього середовища .

Застосування БПЛА у поєднанні з ГІТ значно підвищує ефективність моніторингу. БПЛА забезпечують високоточні дані про стан прибережних зон, дозволяючи оперативно реагувати на зміни та потенційні загрози. Наприклад, у дослідженнях було розроблено методи та технології створення систем комплексного моніторингу морських акваторій та стану прибережних зон з використанням БПЛА для підвищення якості, оперативності та ефективності процесів збирання даних спостережень[40]. .

Важливою складовою є також використання геоінформаційних систем (ГІС) для обробки та аналізу зібраних даних. ГІС-технології дозволяють інтегрувати різноманітні джерела інформації, створювати тематичні карти та моделі, що є основою для прийняття обґрунтованих рішень у сфері екологічного управління.

Загалом, впровадження геоінформаційних технологій у систему екологічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон України сприяє підвищенню ефективності спостережень, своєчасному виявленню та реагуванню на екологічні загрози, а також забезпечує наукове обґрунтування для прийняття управлінських рішень у сфері охорони навколишнього середовища. Інформаційні технології є невід'ємною складовою аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. Вони забезпечують ефективне збирання, обробку та аналіз даних, що дозволяє своєчасно виявляти екологічні загрози, планувати заходи з охорони навколишнього середовища та приймати обґрунтовані управлінські рішення. Українські наукові установи активно впроваджують сучасні інформаційні технології в практику екологічного моніторингу, що сприяє підвищенню ефективності управління природними ресурсами та забезпеченню екологічної безпеки.

В умовах повномасштабної війни, яка триває з 2022 року, питання екологічної безпеки морських акваторій України набула надзвичайної гостроти. Зокрема, територіальні води Чорного та Азовського морів, які вже раніше піддавалися істотному антропогенному навантаженню, зазнали нових загроз, пов'язаних із

безпрецедентними військовими діями[41].. До традиційних джерел забруднення, таких як скиди стічних вод із промислових об'єктів, комунального господарства, агропромислових підприємств, додалися нові – бойові дії, обстріли інфраструктури, підриви гідроспоруд, порушення логістики зворотних вод, знищення очисних споруд, пошкодження хімічних складів і нафтобаз.

У мирний час основними джерелами забруднення морських вод були комунальні підприємства, промисловість, морський транспорт, а також зворотні води зрошувальних систем, зокрема рисових чеків. Проте після початку війни ситуація змінилася. Вибухи, ракетні обстріли прибережної промислової інфраструктури (включаючи об'єкти в Миколаївській, Одеській та Херсонській областях), аварії на очисних спорудах та неконтрольовані скиди забруднених вод створили нові осередки екологічної небезпеки. Особливо небезпечним є руйнування каналізаційних мереж у прифронтових містах, у тому числі Миколаєві, Очакові та Скадовську, де скиди неочищених або частково очищених вод здійснюються безпосередньо у прибережні акваторії. Окремо слід зазначити, що військові дії супроводжуються потраплянням у воду вибухонебезпечних речовин, пального, важких металів та мікропластику, які походять від розірваних боєприпасів.

#### **1.4.2. Створення фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Чорного моря**

Класифікація космічних апаратів для задач екологічного моніторингу умовно поділяється за спектральною чутливістю (оптичні/радіолокаційні), типом зйомки (панхроматична, мультиспектральна, гіперспектральна), та просторовою роздільною здатністю (висока, середня, низька). Наприклад, Landsat-8 із сенсором TIRS дозволяє отримувати дані в інфрачервоному діапазоні, що особливо важливо для температурного аналізу поверхні води, тоді як Sentinel-1A/B забезпечують SAR-зйомку, дозволяючи працювати незалежно від погодних умов та освітлення.

Таблиця 1.2.Порівняльний аналіз супутників

| Супутник    | Розр.    | Спектр          | Повторення (дні) | Особливості                         |
|-------------|----------|-----------------|------------------|-------------------------------------|
| Landsat-8   | 15–100   | VNIR, SWIR, TIR | 16               | Відкритий доступ, архів з 1972 р.   |
| Sentinel-2  | 10–60    | VNIR, SWIR      | 5                | Безкоштовно, високочастотна зйомка  |
| WorldView-3 | 0.31–1.2 | PAN, VNIR, SWIR | <1               | Комерційний, надвисока роздільність |
| Sentinel-1  | 10       | SAR (C-band)    | 6                | Незалежний від погодних умов        |

#### 1.4.3. Створення фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Азовського моря

Таблиця 1.3. Фонд космічних знімків

| Космічний апарат | Кількість знімків | Тип носія / Директорії        |
|------------------|-------------------|-------------------------------|
| NOAA             | 4                 | Диск №1, директорії NOAA      |
| TERRA            | 5                 | Диск №1, директорії TERRA     |
| SPOT             | 6                 | Диск №1, директорії SPOT      |
| LANDSAT          | 9                 | Диск №1, директорії LANDSAT   |
| QuickBird        | 5                 | Диск №1, директорії QuickBird |

Знімки від NOAA, отримані з радіометра AVHRR, дозволяють проводити щоденний моніторинг льодової обстановки, змін у сніговому покриві, а також оперативно виявляти ділянки надмірного цвітіння фітопланктону. Знімки з TERRA (інструмент MODIS) охоплюють більшу кількість спектральних зон і дають змогу проводити температурний аналіз поверхневих вод, виявляти гарячі та холодні течії,

розподіл забруднень, температурну стратифікацію.

SPOT і LANDSAT забезпечують роздільну здатність у межах 10–30 м, що дозволяє досліджувати забруднення стічними водами, активність портової інфраструктури, оцінювати зміни берегової лінії[41].. Знімки з QuickBird, які мають найвищу деталізацію (до 0,61 м), використовуються для дослідження точкових джерел забруднення, локалізації викидів, незаконних скидів у водне середовище. Фонд космічних знімків створюється з урахуванням інформаційно-аналітичної моделі просторових даних. Візуалізація забезпечується за допомогою ГІС-платформ (ArcGIS, QGIS), де кожен знімок геоприв'язується та виводиться у вигляді растрового шару з додатковими аналітичними картографами. Наприклад, картограми охоплення Азовського моря знімками NOAA, TERRA або SPOT дозволяють швидко локалізувати часові вікна спостереження, визначити повторюваність охоплення, оцінити зміну спектральних характеристик об'єктів. Рисунок нижче ілюструє приклад візуалізації покриття акваторії Азовського моря знімками LANDSAT у 2019–2023 роках:



Рис. 1.4. Знімок акваторії Азовського моря із супутника NOAA17



Рис.1.5.Картограма покриття знімками акваторії Азовського моря із супутника NOAA17

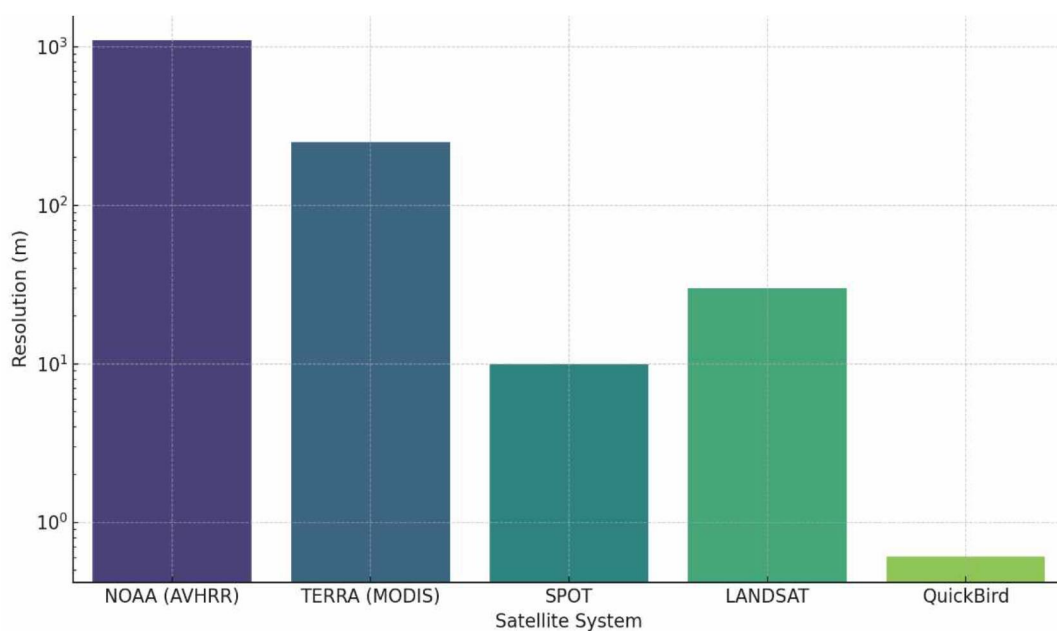


Рис. 1.6. Приклад геокартограми супутникових зйомок акваторії Азовського моря.

В архіві знімків враховується не лише покриття, але й спектральна інформація. Для аналізу якості вод, вмісту домішок, фітопланктону чи нафтопродуктів використовуються спектральні індекси: NDVI, NDWI, NDCI, FAI

тощо. Інформаційні технології дозволяють не лише виявити аномалії, а й розраховувати їхні площі, середні спектральні значення, динаміку змін упродовж років.

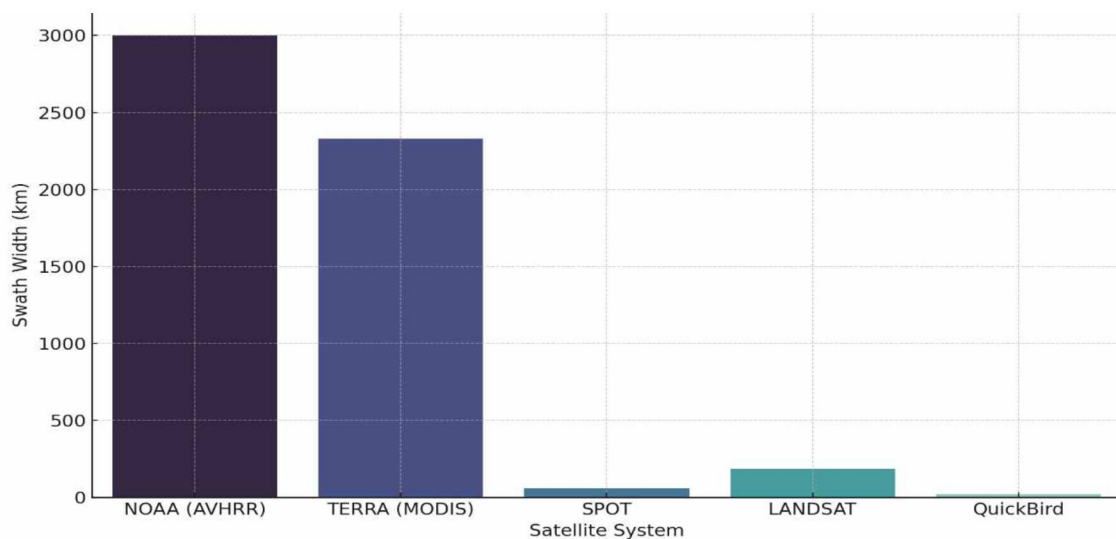


Рис.1.6. Приклад геокартограми спектральної інформації супутникових зйомок акваторії Азовського моря

Додатково, фонд є основою для прогнозного аналізу. Наприклад, за допомогою часових рядів можна прогнозувати поширення плям забруднення, цвітіння вод, зміни температури поверхневого шару, що критично важливо для рибного господарства, туризму, навігації та екологічної безпеки.

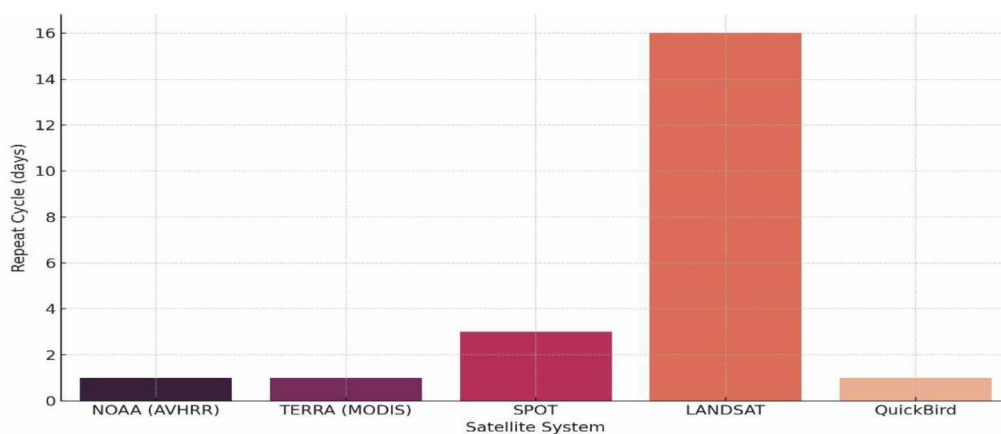


Рис.1.7. Приклад геокартограми часових рядів інформації про нафтові забруднення супутникових зйомок акваторії Азовського моря

Наведені графіки, які ілюструють ключові параметри супутникових систем, що використовуються для моніторингу Азовського моря:

Найвища деталізація спостереження досягається за допомогою супутника QuickBird (0.61 м), що робить його ідеальним для точного картографування прибережних територій. У порівнянні, NOAA має найнижчу роздільну здатність (1100 м), але її перевага — в частоті огляду і широкому покритті.

Ширина смуги зйомки найвища у NOAA (3000 км), що дозволяє охоплювати великі площі за один прохід. Це особливо цінно для оперативного моніторингу великих акваторій, включно з льодовою обстановкою чи аномаліями в морських водах.

NOAA, TERRA та QuickBird мають високий темп повторення зйомки (1 доба), що дозволяє отримувати регулярні оновлення стану середовища. У LANDSAT — цикл повторення значно довший (16 діб), але ці дані мають хорошу якість і широко використовуються для довгострокового аналізу змін.

Ці візуалізації допомагають швидко порівняти ефективність різних космічних апаратів за критеріями точності, масштабу покриття та оперативності, що є основоположними при виборі супутника для конкретних завдань екологічного моніторингу прибережних зон.

Таким чином, створення фонду космічних знімків для Азовського моря – це не лише технічне завдання збирання даних, а повноцінна інформаційна система моніторингу прибережних і відкритих вод, яка охоплює технології збору, архівації, аналітики, візуалізації та прогнозування на основі супутникових даних. Інтеграція цих технологій у природоохоронну практику дозволяє системно реагувати на зміни в екологічному стані морського середовища та приймати обґрунтовані управлінські рішення.

### **1.5. Міжнародний досвід застосування матеріалів космічних зйомок у завданнях моніторингу антропогенного забруднення морських акваторій**

Є прикладом ефективного поєднання високих інформаційних технологій та



екологічної безпеки у глобальному масштабі. Прибережні екосистеми, з їх біорізноманіттям і ресурсним потенціалом, виявляються надзвичайно чутливими до дії антропогенних чинників. Забруднення, пов'язане з промисловими та побутовими стоками, розливами нафти, інтенсивною господарською діяльністю, нерегульованим туризмом та судноплавством, призводить до глибоких змін у гідрооптичних, хімічних та біологічних характеристиках морських вод, що створює необхідність системного і постійного контролю.

Космічні технології, що розвиваються з надзвичайною динамікою, відкрили нові можливості для моніторингу морських акваторій. Дистанційне зондування Землі з орбіти забезпечує отримання об'єктивної інформації про стан навколишнього середовища в глобальному, регіональному та локальному масштабах. Унікальні можливості таких спостережень полягають у великій площі охоплення, високій частоті повторної зйомки, доступі до важкодоступних або небезпечних для дослідження ділянок, а також у здатності до фіксації динамічних процесів у морському середовищі.

Сучасні супутникові платформи здатні реєструвати широкий спектр параметрів водного середовища, які мають ключове значення для виявлення проявів антропогенного забруднення. До них належать: варіації гідрооптичних характеристик води (колір, каламутність), зміни температурних полів, рівня солоності, розподіл фітопланктону, наявність важких металів, плівкових забруднень (зокрема, нафтопродуктів) тощо. Спостереження в мульти- та гіперспектральному режимах дозволяють фіксувати навіть незначні зміни в складі вод, розпізнавати біологічні аномалії, локалізувати джерела забруднень та визначати траєкторії їх поширення.

Одним із найяскравіших прикладів впровадження комплексного супутникового моніторингу є міжнародний пілотний проєкт, реалізований у бухті Мамала поблизу острова Оаху (Гаваї, США) впродовж 2002–2004 рр[42].. Метою дослідження було оцінити вплив глибоководних скидів стічних вод на прибережну

рекреаційну зону, зокрема, на територію пляжу Вайкікі. У ході моніторингу застосовувались численні космічні платформи: оптичні супутники IKONOS та QuickBird, які забезпечували високодетальні панхроматичні та багатоспектральні зображення; радіолокаційні апарати RADARSAT та ENVISAT для фіксації поверхневих деформацій, викликаних нафтовими забрудненнями; гіперспектральна апаратура Hyperion і багатоспектральна ALI із супутника EO-1; багатозональні сенсори MODIS та ASTER із супутників TERRA і AQUA.

Дані зйомок оброблялися як в оперативному режимі безпосередньо в Гонолулу, так і на етапі постпроцесингу з урахуванням синхронних гідрофізичних та метеорологічних вимірювань. Результати моніторингу вказали на високу нестабільність гідродинамічного режиму бухти Мамала через змінність метеоумов і припливно-відпливних процесів, що ускладнює природне очищення акваторії. Було встановлено, що до акваторії щоденно надходить до 70 млн галонів стічних вод, що зумовлює потребу у впровадженні заходів зі зниження антропогенного навантаження.

На основі супутникових даних було сформульовано екологічно орієнтовані рекомендації: оптимізація режимів скидання шляхом зміни конфігурації дифузора; удосконалення технологій очистки стічних вод; інформаційне забезпечення зацікавлених органів та громадськості; впровадження системи безперервного моніторингу на основі космічних даних.

Аналогічні проєкти успішно реалізовані в інших регіонах світу. Наприклад, нафтозабруднення у Чорному, Каспійському морях, у водах поблизу о. Сахалін та в Таїландській затоці були картографовані за допомогою радіолокаційних супутників ERS-2, Envisat, RADARSAT. Усі ці проєкти передбачали використання багатозональних знімків з різним спектральним охопленням, включаючи ІЧ-діапазони, що дозволяло ефективно відслідковувати тонкі плівки нафтопродуктів, аналізувати динаміку фітопланктону, змін температури та солоності.

Міжнародна практика свідчить, що комплексне використання даних

дистанційного зондування — як оптичного, так і радіолокаційного — у поєднанні з даними наземного моніторингу створює потужну основу для формування ефективних систем оцінки стану морських екосистем. Результати таких досліджень знаходять практичне застосування в державній екологічній політиці, у природоохоронній діяльності, а також у розробці стратегій сталого управління прибережними територіями.

Загалом, у сучасних умовах інтенсивного антропогенного впливу космічний моніторинг морських акваторій набуває статусу пріоритетного інструменту екологічного контролю. Його переваги — широкий охоплення, регулярність, незалежність від погодних умов (у випадку радіолокації), висока точність і аналітичність — забезпечують науково обґрунтовану основу для запобігання деградації морського середовища. Подальший розвиток супутникових технологій, розширення спектру реєстрованих параметрів, поєднання з GIS-технологіями і штучним інтелектом значно посилять ефективність екологічного моніторингу морських і прибережних акваторій як на міжнародному рівні, так і в рамках національних природоохоронних програм.

## **Висновки до розділу 1.**

1. Здійснено комплексний аналіз сучасного стану нормативно-правового, організаційного та технологічного забезпечення моніторингу морських акваторій і прибережних зон України. Визначено, що державна система екологічного моніторингу в морських регіонах перебуває на етапі структурної трансформації, зумовленої як глобальними екологічними викликами (кліматичні зміни, антропогенне навантаження, деградація біоресурсів), так і регіональними загрозами, включаючи наслідки воєнних дій.

2. Виявлено обмеженість існуючих підходів щодо інтеграції цифрових технологій у практику водного моніторингу та недостатню адаптованість до швидких змін екологічної обстановки.

3. Запропоновано структурований аналіз чинної нормативно-правової бази

України щодо екологічного моніторингу морських акваторій з позицій її придатності до застосування в умовах високої динаміки загроз, зокрема воєнного характеру.

4.Запропоновано концепцію її адаптації з акцентом на інтеграцію технологій дистанційного зондування, сенсорних мереж і автоматизованої обробки великих обсягів даних.

5.Розроблено системний підхід до формування моделі інтегрованого управління екологічною безпекою прибережних вод, що враховує одночасну координацію фонових, загальних та кризових видів моніторингу на базі єдиної інформаційної платформи.

6.Результати аналізу створюють підґрунтя для переходу до нової парадигми державного управління водними ресурсами морських акваторій, орієнтованої на проактивне прогнозування, адаптивність до кризових ситуацій і цифрову трансформацію процедур екологічного нагляду.

## РОЗДІЛ 2. ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АСПЕКТ КОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН

У розділі розглядаються концептуальні, технічні та прикладні аспекти застосування інформаційних технологій у процесах космічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. В умовах посилення глобальних і регіональних екологічних викликів, а також зростання техногенного навантаження на морське середовище, питання інтегрованого моніторингу за допомогою засобів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) набуває особливої актуальності. Сучасні інформаційні технології — включаючи геоінформаційні системи (ГІС), хмарні обчислювальні сервіси, інструменти комп'ютерного зору, методи глибокого навчання та штучного інтелекту — слугують основою для високоточних систем екологічного аналізу, автоматизованого розпізнавання об'єктів забруднення, оцінки просторово-часової динаміки екосистемних процесів та прогнозування ризиків для прибережного середовища.

В розділі окреслено архітектуру програмно-аналітичних комплексів, що використовують супутникові дані (Sentinel, Landsat, MODIS, WorldView та інші), включаючи особливості їхньої інтеграції з наземними сенсорними мережами. Розкрито алгоритми векторизації, сегментації та класифікації даних спостережень, а також шляхи оптимізації обчислювальних ресурсів (GPU/CPU, Docker-контейнеризація, Kubernetes, хмарні сервіси на кшталт Google Earth Engine та AWS). Особливу увагу приділено використанню технологій машинного навчання (CNN, U-Net, DeepLab) для автоматизованої ідентифікації плям нафтового забруднення, зон евтрофікації, скупчень морського сміття та інших аномальних явищ. Також розглянуто приклади реалізації комплексного підходу до морського моніторингу в Чорноморському регіоні України, з урахуванням природно-ресурсного, рекреаційного та геополітичного значення регіону. У фокусі аналізу — питання побудови тематичних екологічних карт, цифрових моделей ризику, систем

оперативного попередження та прогнозного моделювання стану морського середовища.

## **2.1. Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних**

### **2.1.1. Інформаційні супутникові сервіси**

Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних є ключовим елементом сучасних екосистем управління просторовими, екологічними, інфраструктурними та безпековими даними. У світі стрімкого розвитку цифрових технологій, аерокосмічного моніторингу та штучного інтелекту саме ці інструменти дозволяють інтегрувати, обробляти, аналізувати й візуалізувати великі обсяги супутникової інформації в зручному інтерфейсі — як для науковців, так і для державних органів, військових структур, природоохоронних установ і бізнесу.

Сучасні платформи, такі як Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, NASA Earthdata, Sentinel Hub, USGS EarthExplorer[42]., Planet, Maxar SecureWatch та інші, забезпечують доступ до різночасових супутникових знімків високої та надвисокої роздільної здатності, включаючи мультиспектральні, гіперспектральні, теплові та радарні дані. Кожна платформа має свою спеціалізацію, формат представлення інформації та набір аналітичних інструментів, але всі вони служать для досягнення єдиної мети — надання актуальної, точної та верифікованої інформації про стан земної поверхні та її змін у часі. Завдяки розвитку супутникових технологій та обчислювальних потужностей, сервіси ДЗЗ (дистанційного зондування Землі) стали незамінним інструментом у моніторингу природних ресурсів, контролі землекористування, реагуванні на надзвичайні ситуації, оцінці наслідків стихійних лих, виявленні змін рослинного покриву, прогнозуванні врожаїв, оцінці водних ресурсів, картографуванні забруднення та вивченні антропогенних загроз. У сфері безпеки, платформи ДЗЗ використовуються

для виявлення руйнувань інфраструктури, моніторингу переміщення техніки, фіксації наслідків атак або катастроф, контролю прикордонних зон та підтримки сил цивільного захисту. Наприклад, Google Earth Engine забезпечує хмарну обробку великих обсягів даних, підтримує написання алгоритмів на JavaScript і Python, має бібліотеки індексів (NDVI, NDWI, NBR тощо) і дозволяє швидко здійснювати аналітику змін за десятки років. Платформа Copernicus Open Access Hub, заснована на супутниках Sentinel, забезпечує безкоштовний доступ до регулярних даних спостереження Європейського космічного агентства (ESA), які охоплюють широкі території та мають високу точність для екологічного моніторингу. Махат SecureWatch забезпечує надвисоку роздільну здатність (до 30 см/піксель), що дозволяє розрізняти дрібні деталі інфраструктури, транспорт, техніку, зони ураження тощо. Інформаційні платформи супутникових даних не обмежуються лише отриманням знімків. Вони включають цілу екосистему інтегрованих сервісів: аналітику в режимі реального часу, автоматичне виявлення змін, генерацію картографічної продукції, тематичне дешифрування, обчислення статистичних показників, побудову моделей на основі штучного інтелекту та машинного навчання. Такі сервіси дозволяють користувачам не лише спостерігати за ситуацією, а й прогнозувати майбутні ризики, оптимізувати управлінські рішення, формувати плани реагування та реконструкції. Однією з важливих переваг інформаційних супутникових сервісів є відкритість і доступність для широкого кола користувачів. Наприклад, платформи Sentinel та Landsat надають безкоштовні дані, що особливо важливо для країн, які не мають власної супутникової системи спостереження. Це сприяє розвитку наукових досліджень, громадського моніторингу, волонтерських ініціатив у сфері екології, урбаністики, захисту довкілля, боротьби зі змінами клімату, збереження біорізноманіття. Водночас приватні платформи, як-от Planet, BlackSky, Capella Space, Махат, пропонують комерційні сервіси з високою деталізацією, можливістю замовлення зйомки "на вимогу", щоденним оновленням даних, що ідеально підходить для моніторингу в

умовах воєнних дій, терористичних загроз, відновлення критичної інфраструктури та управління безпековими ризиками. Окрему категорію становлять аналітичні платформи на основі штучного інтелекту (AI/ML), які використовують глибоке навчання для автоматизованого розпізнавання об'єктів на знімках, виявлення змін, класифікації типів покриття, аналізу температурних аномалій або зон ураження. Сервіси на кшталт Descartes Labs, Orbital Insight або Astraea EarthAI застосовують AI для перетворення зображень на структуровану інформацію, що придатна для прийняття стратегічних рішень[43].

У контексті повоєнного відновлення України, платформи супутникового моніторингу мають виняткову роль: вони дозволяють оцінити масштаби руйнувань, картографувати зруйновані населені пункти, ідентифікувати мінні поля, оцінювати стан сільськогосподарських угідь, моніторити хід відновлювальних робіт, виявляти екологічні ризики в зоні бойових дій та підтримувати міжнародні гуманітарні програми.

Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних є складовою цифрової трансформації безпеки, екології та управління в умовах глобальних і локальних викликів[43]. Їх інтеграція в національні системи моніторингу та захисту — це не лише технічна інновація, а й стратегічний крок до підвищення спроможності держави реагувати на кризові ситуації, забезпечувати стійкість критичної інфраструктури, зберігати навколишнє середовище та захищати життя людей.

### **2.1.2. Спектральні діапазони та їх значення для моніторингу**

Спектральні діапазони в контексті дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) є основою для отримання цінної інформації про природні та антропогенні процеси в морських акваторіях і прибережних зонах. Саме здатність сенсорів супутників або аероплатформ реєструвати електромагнітне випромінювання в різних діапазонах довжин хвиль дозволяє досліджувати характеристики водного середовища, зміни



ландшафту, біофізичні параметри, рівень забруднення, процеси евтрофікації, динаміку берегової лінії, вплив кліматичних змін тощо. Широке застосування спектрального аналізу у моніторингу акваторій забезпечується можливістю поєднання видимого, інфрачервоного, короткохвильового й теплового випромінювання для комплексної оцінки стану середовища.

У видимому спектрі (400–700 нм) розташовані синій, зелений та червоний діапазони. Ці канали найбільш інформативні для дослідження прозорості води, наявності завислих речовин, біомаси фітопланктону та зважених частинок (табл. 2.1.). Зокрема, синій канал (450–510 нм) дозволяє аналізувати глибину проникнення світла в товщу води та оцінювати її чистоту. Зелений канал (510–580 нм) особливо чутливий до хлорофілу-а — основного пігменту фотосинтезу, тому широко використовується для виявлення зон активної біологічної продукції, цвітіння води, евтрофікації. Червоний канал (600–700 нм) дозволяє виявляти прибережні структури, визначати лінію берега та виділяти зони з підвищеним вмістом завислих речовин. У ближньому інфрачервоному діапазоні (NIR, 700–900 нм) спостерігається висока відбивна здатність суші (особливо рослинності) та майже повне поглинання водою, що створює чіткий контраст між водною поверхнею та береговими зонами. Це дозволяє з великою точністю визначати межу «вода-суша», відслідковувати підтоплення територій, зміну берегової лінії, динаміку припливів і відпливів, а також виявляти затоплені об'єкти (наприклад, інфраструктуру, поля тощо) [44].

Таблиця 2. 1. Інформативні пункти для дослідження прозорості води

| Категорія пункту | Глибини відбору проб                  | Забруднюючі речовини            | Призначення                              |
|------------------|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------------|
| 1-ша зона)       | (прибережна поверхня, 5, 10, 20 м дно | Нафта, ПАР, феноли важкі метали | Контроль у зонах скиду портів, рекреації |

| Категорія пункту      | Глибини відбору проб         | Забруднюючі речовини        | Призначення                    |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| 2-га (перехідна зона) | поверхня, 10 м, дно          | Ті самі + мігруючі речовини | Моніторинг переносу забруднень |
| 3-тя (відкрите море)  | поверхня, 10, 50, 100 м, дно | Важкі метали, вуглеводні    | Формування балансу речовин     |

Короткохвильовий інфрачервоний діапазон (SWIR, 1 000–2 500 нм) є критично важливим для аналізу вологості ґрунтів у прибережних регіонах, моніторингу пожеж на островах або в приморських лісових масивах, а також для виявлення викидів нафтопродуктів. Нафта має характерний спектральний підпис у цьому діапазоні, що дозволяє її ідентифікувати на поверхні моря — як у випадку аварій танкерів, так і при підводному бурінні.

Тепловий інфрачервоний діапазон (TIR, 8–14 мкм) використовується для спостереження за температурою поверхні моря (Sea Surface Temperature, SST), що є ключовим параметром для вивчення кліматичних змін, океанографічних процесів, теплового забруднення, оцінки теплового стоку з промислових об'єктів, АЕС і ТЕС у прибережній зоні. Завдяки цим даним змодельовано теплові течії, виявляти термальні аномалії, контролювати зони впливу промислових викидів.

Радарні спектральні діапазони (мікрохвильовий діапазон, 1 мм – 1 м) дозволяють здійснювати моніторинг незалежно від погодних умов і часу доби. Датчики SAR (Synthetic Aperture Radar), наприклад Sentinel-1, дозволяють з високою точністю спостерігати за динамікою хвиль, відстежувати рух суден, виявляти нафтові плями, зміни у структурі берегової лінії, розмиви та процеси ерозії, осідання берегів[45]. Радарна поляриметрія дозволяє навіть класифікувати типи поверхонь у зонах припливно-відпливних процесів або мулових берегів.

Важливим інструментом для комплексного використання спектральних діапазонів є спектральні індекси. Наприклад, NDWI (Normalized Difference Water

Index) використовується для виокремлення водних поверхонь, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) — для оцінки вегетаційного покриття в прибережних регіонах, NDCI (Normalized Difference Chlorophyll Index) — для оцінки концентрації хлорофілу, FUI (Floating Unnatural Index) — для виявлення антропогенних відходів у прибережних акваторіях. В останні роки набули популярності алгоритми машинного навчання для мультиспектральної класифікації з використанням рішень з hyperspectral data (гіперспектрального зондування), яке може охоплювати до кількох сотень спектральних каналів.

Використання супутникових даних у різних спектральних діапазонах дозволяє виконувати мультичасовий аналіз стану акваторій, виявляти динаміку змін в екосистемах, сезонні коливання біомаси, оцінювати рівень забруднення, проводити прогнозування надзвичайних ситуацій, таких як шторми, повені або витоки забруднюючих речовин. У цьому контексті інтеграція спектральної інформації з геоінформаційними системами (ГІС) дозволяє створювати високоточні аналітичні моделі для прийняття рішень у сфері екологічного моніторингу, водного господарства, природоохоронного контролю та морської безпеки. Таким чином, спектральні діапазони є не лише технічним параметром супутникових сенсорів, а потужним аналітичним інструментом, що дозволяє глибоко вивчати структуру, динаміку й екологічний стан морських та прибережних зон. Їх правильне застосування у поєднанні з сучасними платформами супутникового моніторингу відкриває нові можливості для управління морськими територіями, підтримки сталої екологічної політики та реагування на виклики сучасності.

Таблиця.2.2. Спектральні діапазони для моніторингу прибережних зон.

| Діапазон спектра        | Довжина хвилі (мкм) | Призначення                         |
|-------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| Видимий (VNIR 0,38–0,72 |                     | Візуалізація, класифікація об'єктів |

| Діапазон спектра | Довжина хвилі (мкм) | Призначення                                                   |
|------------------|---------------------|---------------------------------------------------------------|
| Ближній (NIR)    | 0,72–1,30           | Визначення вегетаційного покриття, вологості                  |
| Середній (SWIR)  | 1,30–3,00           | Виявлення мінералів, вологи в ґрунтах                         |
| Тепловий (TIR)   | 7,00–15,00          | Вимірювання температури поверхні, виявлення теплових аномалій |

### 2.1.3. Характеристики основних супутникових сенсорів

Основні супутникові сенсори, що використовуються для моніторингу акваторій та прибережних зон, мають різні характеристики, які визначають їхню ефективність для досліджень водного середовища, включаючи аналіз температури, якості води, виявлення забруднень, картографування берегової лінії та оцінку біопродуктивності (табл. 2.3.). Розуміння ключових параметрів таких сенсорів, як просторове, спектральне, радіометричне й тимчасове розрізнення, є фундаментом для коректного вибору платформ та обробки отриманих даних у системах дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [45].

1. Landsat (серії TM, ETM+, OLI/TIRS). Програма Landsat, спільно реалізована NASA і USGS, є одним із найтриваліших джерел мультиспектральних даних для моніторингу земної поверхні, включаючи водойми. Наприклад, Landsat 8 оснащений сенсорами OLI (Operational Land Imager) та TIRS (Thermal Infrared Sensor), що забезпечують знімання в 11 спектральних діапазонах, з просторовим розрізненням 30 м у більшості каналів і 100 м у тепловому діапазоні. Важливою перевагою є наявність прибережного (coastal aerosol) каналу, який покращує дослідження прибережних та мілководних зон.

2. Sentinel-2 (MSI). Супутники Sentinel-2A та 2B, які входять до програми

Copernicus (ESA), використовують мультиспектральний сенсор MSI (Multispectral Instrument). Він охоплює 13 спектральних каналів з просторовим розрізненням 10, 20 і 60 метрів. Sentinel-2 особливо ефективний для моніторингу прозорості води, хлорофілу, цвітіння водоростей та виявлення нафтових плям завдяки високій спектральній роздільності у видимому й ближньому ІЧ-діапазоні. Частота повторного знімання – 5 днів (при використанні двох супутників).

3. MODIS (на платформах Terra та Aqua). Сенсор MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) забезпечує дані з широким охопленням (до 2,330 км ширини смуги) і високою частотою знімання (щодня). Він має 36 спектральних каналів, що дозволяють проводити глобальний моніторинг температури поверхні моря (SST), концентрації хлорофілу, вмісту зважених частинок, оцінки первинної продукції та іншого. Просторове розрізнення змінюється від 250 м до 1 км. Незважаючи на порівняно грубу деталізацію, MODIS ідеально підходить для великих акваторій і океанографічного аналізу.

4. VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). VIIRS встановлений на супутниках Suomi NPP та NOAA-20. Він продовжує традиції MODIS, але має покращену геометричну та радіометричну точність, з просторовим розрізненням до 375 м у денних каналах. Використовується для моніторингу морських акваторій, зокрема в оцінці температури поверхні океану, біопродуктивності, виявлення фітопланктону.

5. Sentinel-3 (OLCI, SLSTR, SRAL). Цей супутник програми Copernicus обладнаний сенсорами OLCI (Ocean and Land Colour Instrument), SLSTR (Sea and Land Surface Temperature Radiometer) та SRAL (сенсор для альтиметрії). Вони забезпечують комплексну оцінку морських акваторій: від температури поверхні моря до стану фітопланктону. OLCI має 21 спектральний канал і просторову роздільність 300 м, SLSTR — 1 км у інфрачервоному діапазоні, а SRAL — точність висотних вимірювань на рівні кількох сантиметрів.

6. WorldView-2/3. Це комерційні супутники високої роздільності (до 0.3 м

панхроматично, 1.2 м мультиспектрально), що дозволяють детально аналізувати берегову лінію, стан портової інфраструктури, ділянки скидів забруднювальних речовин, місця скупчення водоростей. WorldView-2 має 8 мультиспектральних каналів, включаючи спеціалізовані прибережні й жовті канали, які підвищують якість досліджень мілководдя.

7. Radar-сенсори: Sentinel-1, TerraSAR-X, RADARSAT-2. Активні сенсори, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, дозволяють вести моніторинг незалежно від погодних умов та освітлення. Вони ефективні для виявлення нафтових плям, моніторингу льодової обстановки, пошуку суден, контролю затоплень прибережних зон. Наприклад, Sentinel-1 працює в діапазоні C з просторовою роздільністю до 10 м, має регулярне оновлення (6-12 днів) і вільний доступ до даних.

Таблиця 2.3. Характеристика супутникових сенсорів для картографування берегової лінії та оцінки біопродуктивності.

| Супутник/Сенсор | Просторова роздільність (м)    | Спектральні діапазони | Особливості                                 |
|-----------------|--------------------------------|-----------------------|---------------------------------------------|
| Landsat-5 TM    | 30 (VNIR, SWIR), 120 (TIR)     | VNIR, SWIR, TIR       | Широке охоплення довготривалий архів        |
| Landsat-7 ETM+  | 30 (VNIR, SWIR), 60 (TIR)      | VNIR, SWIR, TIR       | Панхроматичний канал 15 м                   |
| Landsat-8 TIRS  | 100 (TIR)                      | TIR                   | Покращена точність температурних вимірювань |
| Terra ASTER     | 15 (VNIR), 30 (SWIR), 90 (TIR) | VNIR, SWIR, TIR       | Висока спектральна роздільність             |
| Sentinel-2 MSI  | 10–60                          | VNIR, SWIR            | Висока частота зйомки безкоштовний доступ   |

## **2.2. Інформаційні технології в супутниковому моніторингу прибережних зонах**

### **2.2.1. Платформи обробки та візуалізації супутникових даних**

Сучасні інформаційні технології відіграють ключову роль у трансформації супутникових даних у корисну інформацію для прийняття рішень. Вони забезпечують інструменти для обробки, аналізу та візуалізації великих обсягів даних, що надходять від різноманітних супутникових місій.

NASA Earthdata пропонує низку інструментів, таких як Worldview, які дозволяють інтерактивно переглядати понад 1 200 глобальних шарів супутникових зображень у повній роздільній здатності та завантажувати відповідні дані.

NOAA NESDIS надає інтерактивні карти, які допомагають візуалізувати екологічну інформацію, накладаючи її на карти для полегшення розуміння та виявлення тенденцій.

EOS Data Analytics (EOSDA) розробляє інноваційні рішення для аналізу супутникових даних, зокрема для сільського господарства та лісового господарства, використовуючи штучний інтелект для перетворення супутникових зображень у практичну інформацію.

### **2.2.2. Використання штучного інтелекту та машинного навчання**

Штучний інтелект (ШІ) та машинне навчання (МН) стають невід'ємною частиною обробки супутникових даних. Вони дозволяють автоматизувати процеси виявлення та класифікації об'єктів на зображеннях, що значно підвищує ефективність моніторингу.

Наприклад, дослідження, присвячене виявленню морського сміття в прибережних районах за допомогою Sentinel-2, продемонструвало ефективність глибоких сегментаційних моделей у виявленні скупчень морського сміття, що містить пластикові відходи.

### 2.2.3. Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи

Інтеграція супутникових даних у ГІС дозволяє створювати комплексні моделі для аналізу та прогнозування екологічних процесів у прибережних зонах. Це включає в себе:

Моделювання змін берегової лінії: Використання багаточасових супутникових зображень для аналізу ерозії та акумуляції в прибережних районах.

Моніторинг якості води: Аналіз спектральних характеристик водних мас для виявлення забруднень, таких як нафтові плями або цвітіння водоростей.

Оцінка впливу кліматичних змін: Вивчення змін температури поверхні моря, рівня моря та інших параметрів для оцінки впливу глобального потепління на прибережні екосистеми[46].

## 2.3. Фізичні основи космічного моніторингу морських акваторій

### 2.3.1. Оптичний діапазон

В оптичному діапазоні застосовуємо як пасивні, так і активні методи ДЗЗ. При використанні пасивних методів інформативний сигнал - це відбите сонячне випромінювання. Власним випромінюванням атмосфери і підстиляючої поверхні в оптичному діапазоні можна знехтувати. При використанні активних методів інформативним сигналом є відбите монохроматичне випромінювання лідарних систем. Нині у методах ДЗЗ із космосу основну роль в оптичному діапазоні відіграють пасивні методи.

Основною характеристикою взаємодії випромінювання в оптичному діапазоні із зондуємим середовищем є коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ),  $\rho$  – величина, яка дорівнює відношенню яскравості даної поверхні в заданому напрямку  $B(\lambda)$  до яскравості ідеально розсіювальної поверхні  $B_0(\lambda)$  з коефіцієнтом відбиття рівним одиниці і освітленої так само, як і дана поверхня:



$$\rho(\lambda) = B(\lambda) / B_0(\lambda).$$

За ідеальний розсіювач зазвичай беремо поверхні, які рівномірно розсіюють усі довжини хвиль спектра, наприклад: гіпсові пластинки, пластинки, покриті шаром барію та ін.

При відбитті світла водним середовищем світловий потік, який випромінюється водною поверхнею, складається з потоку, відбитого від межі поділу повітря – вода, і світлового потоку з-під водної поверхні. Перша складова називається коефіцієнтом дзеркального відбиття (КДЗВ), друга – коефіцієнтом дифузного відбиття (КДВ). Інтенсивність першої складової залежить від спадного потоку безпосередньо на водні поверхню і КДЗВ. Величина КДЗВ визначається властивостями і станом водної поверхні. Її зміни зумовлюються варіаціями властивостей водної поверхні і комплексного показника заломлення водного середовища у поверхневому шарі води. До чинників, що впливають на величину КДЗВ, належать: хвилювання водної поверхні, наявність на ній нафтових чи інших поверхневих плівок, піни та інших поверхневих утворень, заростання водойм макролітами, тощо. Для гладенької водної поверхні КДЗВ можна розрахувати за формулою Френеля, що в разі нормального падіння променей на водну поверхню має вигляд:

$$R_e(\lambda) = (n(\lambda) - 1)^2 + \kappa^2(\lambda) / (n(\lambda) + 1)^2 + \kappa^2(\lambda), \quad (2.1.)$$

де  $n$  - відносний показник заломлення світла на межі поділу повітря-вода;  $\kappa$ -показник поглинання світла водою.

За допомогою цієї формули можна пояснити зміни величини реєстрованого методами ДЗЗ сигналу за наявності на водній поверхні товстих плівок (товщина плівки  $d \gg \lambda$ ) і заростання водойм[47]. Для завдань екологічної безпеки водних

об'єктів найцікавішою є можливість ідентифікації на їх акваторіях нафтових плівок. Ефективність ідентифікації плівок можна оцінювати за критерієм контрасту коефіцієнта відбивання  $R$ :

$$K(\lambda) = (R(\lambda) - R_{\phi}(\lambda)) / R_{\phi}(\lambda), \quad (2,2.)$$

де  $R$  і  $R_{\phi}$  – спектральні коефіцієнти відбивання відповідно нафти і фонові водної поверхні.

В оптичному діапазоні коефіцієнт відбивання нафти більший, ніж води. Він приблизно сталий, а коефіцієнт відбивання води спадає зі збільшенням довжини хвилі. Отже, на космічних знімках оптичного діапазону товсті нафтові плівки виглядають світлішими, ніж фонові вода.

Доведено, що основний внесок у відбитий світловий потік дають інтерференційні ефекти в плівці. Величина коефіцієнта відбивання характеризується інтерференційними коливаннями, коли змінюється товщина плівки  $d$ . В міру збільшення товщини плівки ці коливання загасають через поглинання світла нафтою. Чим більший показник  $\kappa$ , тим швидше відбувається загасання. У природних умовах товщина плівки на поверхні води змінюється від центральної частини плями до периферії, а також під впливом різних чинників. З цієї причини на космічних знімках для зображень нафтових плівок характерне чергування світлих і темних смуг на периферії забруднених ділянок по всій площі забруднення.

Розглянемо другу складову відбитого від водної поверхні світлового потоку – КДВ. Її величина залежить від первинних гідрооптичних характеристик (ПГХ), таких як показник ослаблення  $\alpha$ , показник розсіювання  $\beta$ , показник поглинання  $\kappa$ , індикатриса розсіювання, тощо. ПГХ, у свою чергу, залежать від концентрації різних розчинених і завислих у воді речовин. Для вирішення завдань моніторингу екологічної безпеки водних об'єктів важливо знати просторовий розподіл в них

концентрацій завислих речовин. На космічних знімках в оптичному діапазоні ділянки акваторій з вищою концентрацією завислих речовин, як правило, світліші.

Спектральне поглинання чистою водою зростає з довжиною хвилі. У ближній і середній ІЧ-зонах цей чинник зумовлює низькі значення КДВ. Розсіювання в чистій воді відбувається на флуктуаціях щільності. Цей процес описує теорія Смолуховського-Ейнштейна, відповідно до якої показник розсіювання спадає з довжиною хвилі за степеневим законом:  $\beta_0 = \beta_{01} \cdot \lambda^{-m}$ , де показник степеня  $m=4$ , а коефіцієнт  $\beta_{01}$  змінюється в невеликих межах залежно від температури води і величини  $\frac{dn}{d\rho}$  ( $\rho$  – щільність води).

Розглянуті спектральні залежності ПГХ чистої води зумовлюють монотонне спадання КДВ чистої води від максимальних значень частини спектра, що відповідає голубим хвилям, до мінімальних значень у ближній і середній ІЧ-зонах. У природних водах розчинені оптично активні речовини представлені здебільшого розчиненою забарвленою органікою, яку часто називають «жовтою речовиною». Остання помітно впливає на формування відбитого з-під водної поверхні світлового потоку тільки у короткохвильовій ділянці оптичного діапазону. Розсіювання електромагнітного випромінювання на завислих часточках залежить від довжини хвилі розсіюваного випромінювання, розмірів і форми часточок, їх оптичних властивостей. Загалом великі часточки розсіюють світло не селективно по спектру, а розсіювання дрібними завислими часточками спадає зі збільшенням довжини хвилі, але повільніше, ніж розсіювання чистою водою.

Поглинання світла завислими часточками залежить від їх природи. Поглинанням світла неорганічними завислими речовинами, як правило, можна знехтувати. У випадку завислих часточок біологічного походження (фітопланктон, детрит) спектральний показник поглинання світла має різко окреслені локальні максимуми, положення та інтенсивність яких визначається вмістом у завислих

речовинах різних пігментів. Для завдань управління екологічною безпекою водних об'єктів важливо знати вміст у фітопланктоні хлорофілу-*a*, тому що цей показник характеризує ступінь евтрофування вод. Установлено, що спектр поглинання хлорофілу-*a* в оптичному діапазоні має два великі максимуми з центрами на довжинах хвиль  $\lambda_1 = 430$  і  $\lambda_2 = 675$  нм.

За високого вмісту у фітопланктоні інших пігментів у спектрі КСЯ можливі локальні мінімуми. Врахування спектральних залежностей ПГХ показує, що спектральна залежність КДВ має локальний максимум у центральній частині оптичного діапазону, тому що у короткохвильовій частині КДВ зменшується через поглинання «жовтою речовиною», а у довгохвильовій і ближній ІЧ – внаслідок поглинання чистою водою.

Зі збільшенням концентрації завислих речовин максимум спектрального КДВ зміщується в довгохвильову зону. Крім того, спектральна залежність КДВ може мати локальні мінімуми, пов'язані з поглинанням пігментами фітопланктону.

У дуже каламутних водах наявність пігментів фітопланктону відбиває лише одна смуга поглинання поблизу  $\lambda = 675$  нм. У прозорих водах з низьким вмістом органічних завислих речовин мінімуми в спектрі КДВ, зумовлені поглинанням пігментами фітопланктону, не виявляються зовсім. Однак і в цьому разі спектр КДВ може містити інформацію про концентрацію фітопланктону. Зазначимо, що зменшення спектральної інтенсивності відбитого світлового потоку, зумовлене збільшенням вмісту хлорофілу *a* у фітопланктоні, може бути зареєстровано тільки у разі дистанційної зйомки з високою спектральною роздільною здатністю. При ДЗЗ із космосу найширше використовують багатозональну зйомку з відносно широкими спектральними каналами. За такої спектральної роздільної здатності зменшення інтенсивності відбитого світлового потоку, зумовленого поглинанням хлорофілом *a*, не реєструється, і збільшення концентрації фітопланктону призводить, як і в разі неорганічних завислих речовин, до збільшення КДВ. У водах з низькими

концентраціями завислих речовин і «жовтої речовини» показник ослаблення світла визначається в основному показником поглинання чистою водою  $k_0$ , отже, глибина шару, який формує відбитий світловий потік, у оптичній і ближній ІЧ-ділянці спектра спадає зі зростанням довжини хвилі. Якщо глибина водного об'єкта менша за товщину шару, який формує відбитий світловий потік, то інтенсивність відбитого від водної поверхні світлового потоку залежить також від глибини дна і коефіцієнту його відбивання. Наявність вертикального градієнта концентрації завислих речовин призводить до збільшення КДВ зі зростанням концентрації з глибиною і до зменшення КДВ – у протилежному випадку. Зміна КДВ буде тим сильнішою, чим більша величина градієнта і чим ближче до поверхні води він знаходиться. Таким чином з наведеного вище витікає, що формування світлового потоку, відбитого від водної поверхні, його величина визначається, головним чином, наявністю на водній поверхні нафтових плівок, їх товщиною, іншими поверхневими утвореннями (піною, ряскою тощо), концентраціями завислих речовин, розчиненої забарвленої органіки, їх вертикальним розподілом, співвідношенням між органічною і неорганічною фракціями завислих речовин.

### 2.3.2. Інфрачервоний діапазон

Характер впливу хвилювання на коефіцієнт відбивання в ІЧ-діапазоні залежить від кута спостереження: за малих кутів він зростає зі збільшенням хвилювання, а коефіцієнт випромінювання відповідно спадає; за великих кутів спостерігається зворотна картина.

Термодинамічна температура поверхневого шару води безпосередньо впливає, головним чином, на випромінювальні характеристики водної поверхні. Ця залежність визначається функцією Планка і покладена в основу визначення температури поверхневого шару води у морях і внутрішніх водоймах методами ІЧ-радіометрії. Варто враховувати такі чинники, що утруднюють оцінку термодинамічної температури за даними ІЧ-радіометрії: 1) яскравісна температура

залежить не тільки від термодинамічної, а і від коефіцієнта випромінювання; 2) власне випромінювання водного середовища формується у тонкому шарі завтовшки до 0,02 мм, температура якого зазвичай відрізняється від температури глибших шарів[48].

Вплив термодинамічної температури на відбивні властивості водної поверхні значно слабкіший, ніж на випромінювальні властивості. У спектральному діапазоні 3 – 11 мкм максимальний коефіцієнт відбивання спостерігається при температурі 20 °С. Зі зниженням температури ( $< 20^{\circ}\text{C}$ ) чи з її підвищенням ( $> 20^{\circ}\text{C}$ ) спостерігається незначне зменшення відбивної здатності води. При довжині хвилі 10,6 мкм зміна коефіцієнта відбивання помітніша, ніж при довжині 3,39 мкм.

Хоча глибина шару води, що формує відбите від водної поверхні ІЧ-випромінювання, і є дуже незначною, не слід нехтувати вкладом на його інтенсивність складу води. Відомі експериментальні дані щодо тісної негативної кореляції між коефіцієнтом випромінювання у ІЧ-діапазоні і невисоких концентраціях завислих речовин ( $< 1,1 \text{ мг/л}$ ).

Таким чином, інтенсивність відбитого водним середовищем ІЧ-випромінювання, залежить від таких чинників, як наявність і товщина поверхневих плівок, хвилювання, піна, наявність інших поверхневих утворень, солоність. Власне ІЧ-випромінювання водного середовища, крім перелічених чинників, визначається насамперед термодинамічною температурою тонкого поверхневого шару води. Високі значення спектрального показника поглинання чистою водою в ІЧ-діапазоні зумовлюють незначну глибину проникнення випромінювання під водну поверхню. Внаслідок цього відбитий потік випромінювання, що виходить з-під водної поверхні, і власне випромінювання водного середовища формуються у вузькому приповерхневому шарі на глибині до 0,02 мм. Механізм впливу поверхневих плівок на КДЗВ водної поверхні аналогічний розглянутому вище для оптичного діапазону. Наприклад, як і в оптичному діапазоні, КДЗВ нафти в ІЧ-діапазоні вищий, ніж КДЗВ чистої води, тобто нафта на зображеннях, отриманих у разі активного зондування в

ІЧ-діапазоні, виглядає світлішою на фоні чистої води. Яскравісний контраст між нафтою і водою в ІЧ-діапазоні вищий, ніж в оптичному, внаслідок нижчих значень КДЗВ чистої води, що, в принципі, дає змогу ефективніше ідентифікувати забруднення водної поверхні нафтою. Збільшення альbedo водної поверхні за наявності нафтових плівок впливає на коефіцієнт випромінювання, що дає змогу ідентифікувати поверхневі плівки також і за даними пасивних методів ІЧ-радіометрії. При цьому, однак, варто враховувати ту обставину, що поверхневі плівки викликають зміну інтенсивності власного випромінювання водного середовища не тільки внаслідок зміни коефіцієнта випромінювання, а й у результаті дії інших механізмів: зміни термодинамічної температури водної поверхні через пригнічення нафтовою плівкою випаровування і зміни ефективного коефіцієнта теплопровідності, гасіння плівкою хвилювання тощо. Аналіз спільної дії перелічених чинників свідчить, що сумарна зміна під впливом нафтової плівки яскравісної температури може бути як позитивною, так і негативною залежно від метеорологічних обставин, товщини нафтової плівки і часу, що минув після виливу нафти. Як правило, домінуючим чинником є ефект підвищення температури поверхневого шару внаслідок пригнічення плівкою випаровування.

### 2.3.3. Надвисокочастотний діапазон

Ефективна площа розсіювання (ЕПР) і радіояскравісна температура  $T_y$  водної поверхні, які реєструються в надвисокочастотному діапазоні електромагнітних хвиль, залежать від комплексної діелектричної проникності (ДП) водного середовища у поверхневому шарі:

$$\epsilon y = \epsilon y_1 + i \epsilon y_2. \quad (2,3.)$$

Основні чинники, що впливають на діелектричну проникність води, – солоність і температура. Теоретично їх вплив на діелектричну проникність води можна пояснити на основі модифікованої моделі Дебая:

$$\varepsilon_{\text{в1}} = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}, \quad (2,4.)$$

$$\varepsilon_{\text{в2}} = \frac{\lambda_s}{\lambda} * \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2} + \frac{\sigma_i \lambda}{2\pi c}, \quad (2,5.)$$

де  $\varepsilon_s$  – статична ДП води;  $\varepsilon_0 = 4,9$  – високочастотна (оптична) межа ДП;  $\sigma_i$  – іонна провідність солоної води;  $\lambda_s = 2\pi c\tau$  – критична довжина хвилі;  $c$  – швидкість поширення електромагнітного випромінювання;  $\tau$  – час релаксації (час, потрібний для повернення дипольних моментів після миттєвого вимикання поля у попередній стан).

З наведених формул видно, що солоність особливо сильно впливає на уявну частину ДП, тому що провідність прямо пропорційна концентрації іонів солей. Врахування залежностей параметрів  $\varepsilon_s$ ,  $\varepsilon_0$ ,  $\lambda_0$  від солоності показує, що величина  $\varepsilon_{\text{в2}}$  різко зростає зі збільшенням солоності тільки в довгохвильовій частині спектра, причому це зростання пропорційне солоності і довжині хвилі випромінювання. За  $\lambda < \lambda_0$  залежність  $\varepsilon_{\text{в2}}$  від солоності неістотна. На рис.1.8 наведено графіки, що ілюструють залежність величин  $\varepsilon_{\text{в1}}$  і  $\varepsilon_{\text{в2}}$  від температури, солоності і довжини хвилі випромінювання. У чистій воді  $\varepsilon_{\text{в1}}$  монотонно зменшується зі зменшенням  $\lambda$ , а  $\varepsilon_{\text{в2}}$



має максимум при  $\lambda = \lambda_0$ . Величина  $\lambda_0$  зменшується від 4 до 2 см з підвищенням температури від 0 до 20 °С.

Крім розглянутих, на величину ДП водного середовища впливають такі чинники, як поверхневі плівки і пінні утворення. ДП пінні обернено пропорційна концентрації повітря. Спектральний хід ДП пінні аналогічний спектральному ходу ДП води.

Уявна частина ДП збільшується з довжиною хвилі.

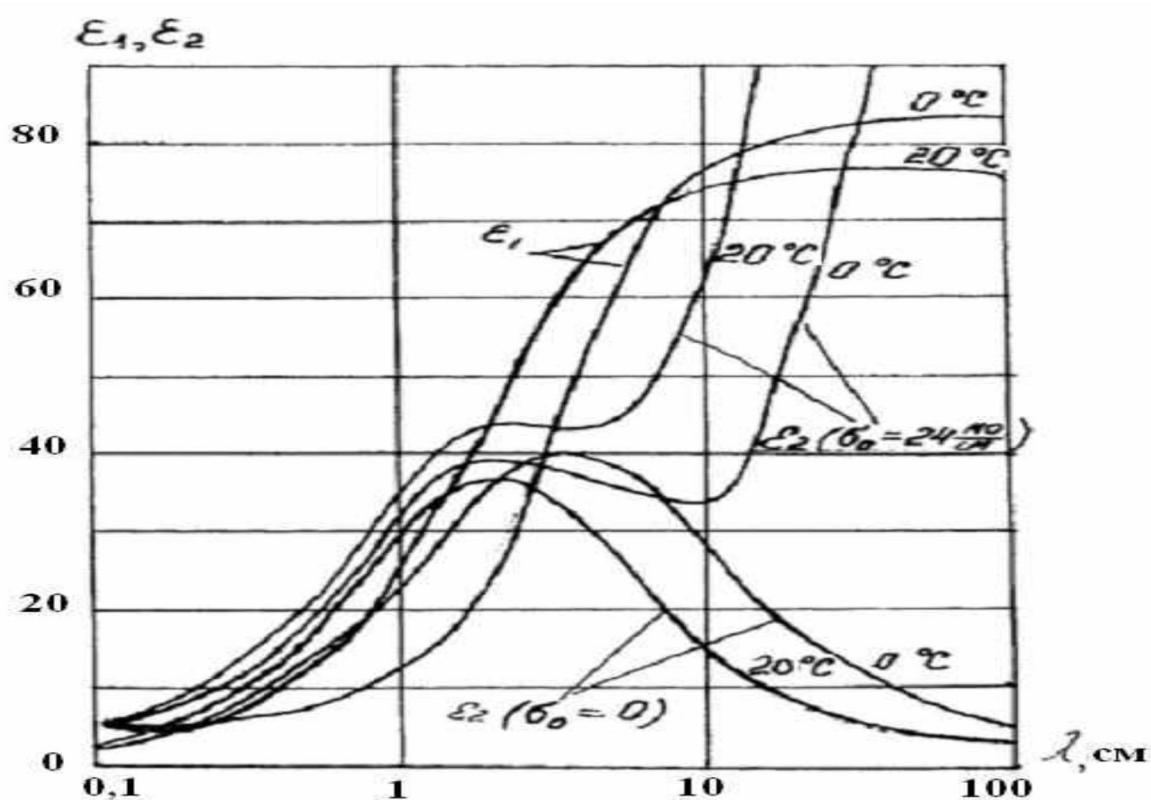


Рис. 2.1. Залежність дійсної  $\epsilon_1$  та уявної  $\epsilon_2$  частин діелектричної проникності води від довжини хвилі  $\lambda$ , солоності  $\sigma$  і температури

Випромінювальні і відбивні властивості підстиляючих поверхонь залежать не тільки від їхніх діелектричних характеристик, а й від структури поверхні. Стосовно водної поверхні це означає залежність від інтенсивності і спектра поверхневих хвиль. Отже, величина ЕПР і випромінювальна здатність водної поверхні залежать від чинників, що впливають на хвилювання. Найважливішими з них є швидкість

вітру і наявність поверхневих плівок. Зі збільшенням швидкості вітру підсилюється дрібномасштабний компонент хвилювання водної поверхні, що призводить до зростання ЕПР за кутів  $\theta > 10^\circ$ . Це збільшення яскравіше виражене при  $\theta > 30^\circ$ .

Наявність на водній поверхні нафтової плівки, навпаки, пригнічує дрібномасштабну складову, що викликає зменшення ЕПР за  $\theta > 30^\circ$  і його збільшення на квазідзеркальній ділянці. На хвилювання водної поверхні може впливати також топографія дна. Цей вплив виявляється в модуляції ЕПР, що обернено пропорційна квадрату глибини.

Вплив хвилювання на величину ЕПР більший, ніж діелектричних властивостей водного середовища, тому, наприклад, вплив нафтових плівок на величину сигналу, який реєструється при активній радіолокації, виявляється, насамперед, непрямым шляхом через зміну структури хвилювання.

При розгляді впливу нафтових плівок на радіояскравісну температуру слід урахувати інтерференційні ефекти, що призводять до залежності радіояскравісного контрасту від відношення  $h/\lambda$  (де  $h$  – товщина плівки). Максимальний контраст (до 80 К) спостерігається при  $h/\lambda \approx 0,15$ . Якщо нафтова плівка знаходиться на водній поверхні тривалий час (понад 24 годин), залежність  $T_y$  від величини  $h$  зменшується внаслідок трансформації плівки у водонафтову емульсію. Збільшення швидкості вітру призводить до підвищення  $T_y$  як за рахунок зміни спектра хвилювання, так і за рахунок наростання піни. Зі збільшенням швидкості вітру від 0 до 10 м/с  $T_y$  підвищується приблизно на 10 К. Солоність впливає на величину ЕПР і  $T_y$  значно слабкіше. Вплив цього параметра істотніший при  $\lambda > 30$  см. Збільшення солоності спричинює зменшення ЕПР і збільшення  $T_y$ .

Отже, за активного зондування акваторій у НВЧ - діапазоні на величину реєстрованого сигналу, в основному, впливають чинники, пов'язані зі зміною хвилювання водної поверхні – швидкість вітру, наявність поверхневих плівок,

топографія дна. Крім того, значно меншим виявляється вплив солоності і температури[49].

Вплив солоності істотніший у довгохвильовій частині спектру. У разі пасивного НВЧ-зондування на радіояскравісну температуру найбільше впливають термодинамічна температура, солоність, поверхневі плівки, причому величина  $T_y$  залежить від товщини плівок, якщо вони не перейшли в емульгований стан. Крім того, на величину  $T_y$  впливають хвилювання, наявність піни та інші чинники.

## **2.4. Інформаційні технології обробки супутникових знімків**

### **2.4.1. Просторові платформи обробки супутникових знімків.**

Інформаційні технології обробки супутникових знімків відіграють ключову роль у сучасному моніторингу довкілля, плануванні територій, оцінці природних ресурсів, аналізі змін у прибережних та морських зонах, а також в управлінні надзвичайними ситуаціями. В умовах збройних конфліктів, антропогенних навантажень і кліматичних викликів ці технології забезпечують швидке, об'єктивне та багатоаспектне оцінювання стану земної поверхні та акваторій. Завдяки стрімкому розвитку супутникових платформ, сенсорів високої роздільної здатності та потужним інструментам цифрової обробки даних, відбувається трансформація уявлень про просторово-часовий аналіз територій.

Обробка супутникових знімків — це багаторівневий процес, який охоплює етапи передобробки, тематичної інтерпретації, класифікації, візуалізації, збереження та інтеграції даних у геоінформаційні системи. Сучасні інформаційні технології дозволяють реалізувати цей цикл із мінімальним втручанням людини, з використанням алгоритмів штучного інтелекту, глибинного навчання, хмарних обчислень та спеціалізованих геопросторових платформ.

Передобробка супутникових зображень. Першим і обов'язковим етапом є геометрична та радіометрична корекція знімків. Геометрична корекція усуває

просторові викривлення, що виникають внаслідок руху супутника, рельєфу місцевості та кута знімання. Радіометрична корекція нормалізує значення яскравості (відбиття) пікселів, враховуючи атмосферні умови, сонячну інсоляцію та технічні характеристики сенсора. Для цих задач широко застосовуються автоматизовані інструменти, реалізовані у програмних платформах ENVI, ERDAS Imagine, QGIS, ArcGIS Pro, а також хмарних середовищах, таких як Google Earth Engine (GEE) та ESA SNAP.

Просторовий аналіз та фільтрація. На наступному етапі здійснюється вилучення релевантної інформації зі знімків. Це включає просторову фільтрацію, сегментацію зображення, підвищення контрастності, побудову індексів (NDVI, NDWI, MNDWI, NDBI тощо), які дозволяють виявляти зміни рослинності, вологи, урбанізованих територій, плям нафти на воді, оптичних характеристик поверхні. Важливою складовою є застосування фільтрів згладжування, згорткових матриць та анізотропної обробки для покращення якості зображень і виділення об'єктів[50].

Класифікація та тематичне дешифрування. Тематичний аналіз здійснюється за допомогою класифікації пікселів — супутникові зображення перетворюються у тематичні карти. Застосовуються як методи машинного навчання (Random Forest, SVM, Decision Tree), так і алгоритми глибокого навчання (Convolutional Neural Networks – CNN), що дозволяють підвищити точність автоматичного розпізнавання об'єктів. Ці технології стали особливо ефективними у виявленні змін (change detection), моніторингу катастроф (пожежі, затоплення, зсуви), аналізі урбанізації та деградації природних ландшафтів.

У контексті воєнного часу тематичне дешифрування застосовується для виявлення наслідків обстрілів, змін лінії фронту, зруйнованих об'єктів критичної інфраструктури, і навіть маскувальних споруд.

### 2.4.2. Хмарні геоінформаційні системи та інтеграція з ГІС

Завдяки розвитку хмарних обчислень, обробка великих обсягів супутникових даних стала доступною для дослідників та управлінців. Платформи Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, PlanetScope, NASA Worldview, Amazon Open Data дають змогу отримати безкоштовний доступ до архівів супутникових знімків (Sentinel, Landsat, MODIS, VIIRS тощо), а також здійснювати обробку, аналіз та візуалізацію без завантаження на локальні комп'ютери. У хмарних середовищах можна запускати скрипти на мовах JavaScript, Python, інтегруючи алгоритми машинного навчання та обробки зображень у потік роботи.

Ключовою перевагою сучасних інформаційних технологій є їх інтеграція з геоінформаційними системами (ГІС). Супутникові дані можуть бути накладені на векторні шари, бази даних, карти ризиків, моделі територій. Це дозволяє будувати цифрові моделі рельєфу (DEM), карти оцінки забруднення, прогностичні карти затоплення, моделі ерозії, розрахунки площ ураження тощо.

Окремі інформаційні системи створюються для цільових галузей: екологічного моніторингу (EcoMonitoring GIS), управління природоохоронними територіями (Protected Areas Monitoring), безпеки та оборони (GeoIntelligence Platforms), управління катастрофами (Disaster Monitoring Information System). Такі системи інтегрують аналітичні модулі, інтерфейси візуалізації, бази даних та інструменти автоматизованої оцінки ризиків.

Приклад шарів інтерактивної карти природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод Північно-західної частини Чорного моря на рис.2..

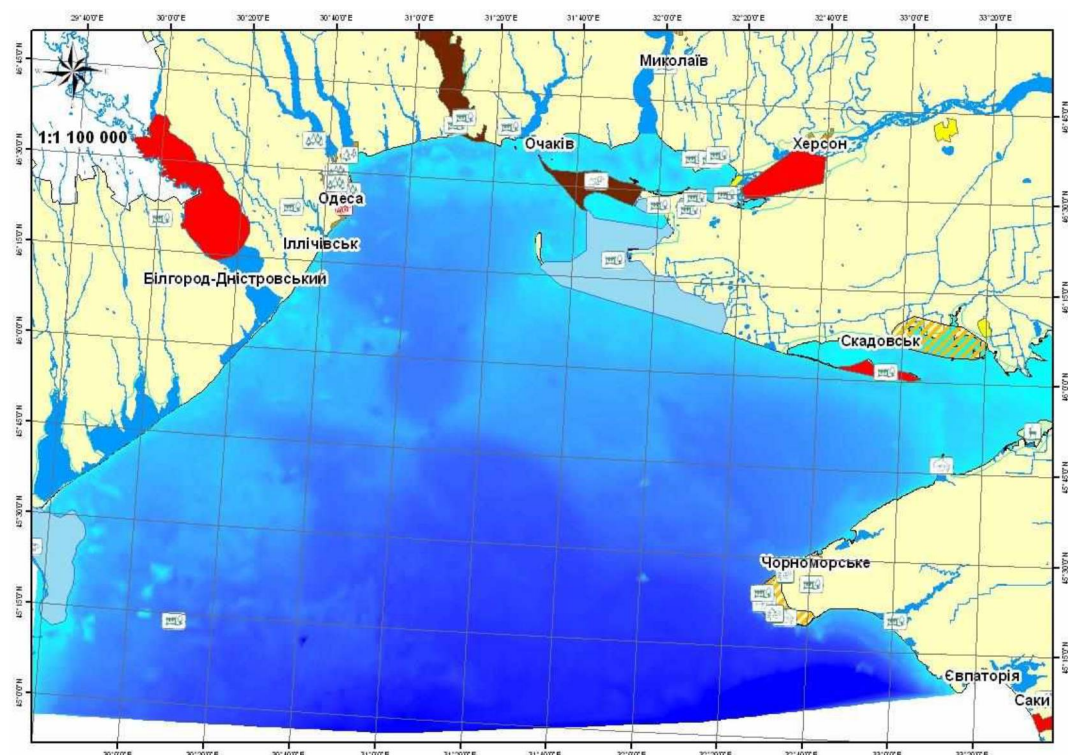


Рис.2.1 Карта природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод  
Північно-західної частини Чорного моря

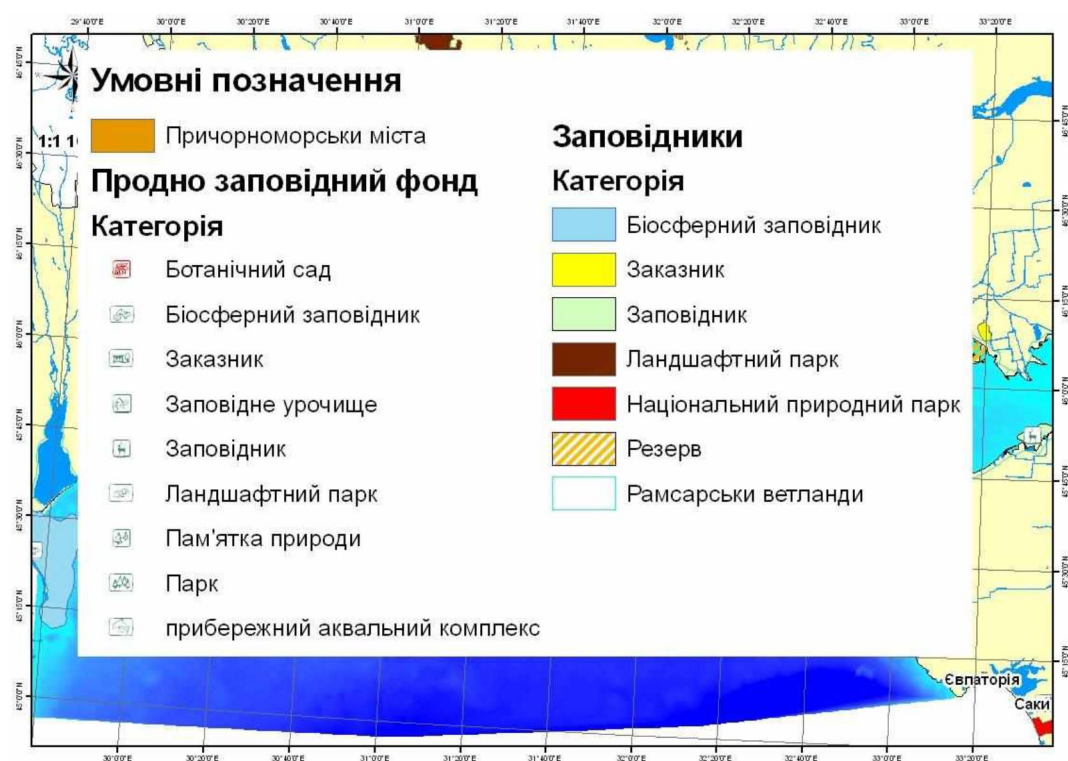


Рис. 2.2 Умовні позначення категорій забруднення

Попри значні досягнення, технології обробки супутникових знімків стикаються з викликами: необхідністю якісної інтерпретації даних, обмеженнями щодо хмарності, складністю автоматичної класифікації в умовах змішаних пікселів, потребою в обчислювальних ресурсах для обробки гіперспектральних знімків.

Проте у найближчій перспективі очікується зростання ролі штучного інтелекту, інтернету речей (IoT), глобальних моделей прогнозування, а також підвищення просторової, тимчасової та спектральної роздільності супутників (наприклад, використання мікросупутників і платформ SAR). Внаслідок цього обробка супутникових зображень перетвориться на інтегрований компонент інформаційного цифрового середовища сталого управління територіями.

Таким чином, інформаційні технології обробки супутникових знімків є потужним інструментом аналізу реального часу, що забезпечує прийняття рішень у сфері екологічної безпеки, оборони, управління ресурсами та реагування на надзвичайні ситуації. Їх впровадження є критично важливим для повоєнного відновлення України, адаптації до кліматичних змін та цифрової трансформації суспільства.

## **Висновки до розділу 2.**

1. Вдосконалено інформаційно-технологічний аспект космічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон, що є важливим для ефективного аналізу екологічного стану прибережних територій та водних ресурсів.

Використання інформаційних платформ, таких як Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, Sentinel Hub, Maxar SecureWatch, дозволяє отримувати актуальні, точні й верифіковані дані, необхідні для моніторингу, управління ресурсами, виявлення змін у середовищі та реагування на надзвичайні ситуації.

Створено ефективні моделі для оцінки екологічних ризиків і прогнозування змін на основі інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи

Виявлення нафтових плям, дослідження рівня хлорофілу та визначення зони

"вода-суша" є важливими аспектами для екологічного моніторингу прибережних зон та дали змогу побудувати карти забруднення.

2. Супутникові сенсори, надають високоточні дані, необхідні для картографування берегової лінії, оцінки стану фітопланктону, виявлення змішування водних шарів, а також для вивчення впливу глобальних кліматичних змін на морські екосистеми. Це дозволяє оперативно виявляти зміни, пов'язані з антропогенними факторами та природними процесами, і прогнозувати можливі екологічні катастрофи.

3. Спектральні діапазони, які використовуються для аналізу водного середовища дали змогу детально досліджувати рівень забруднення води, процеси евтрофікації, зміну ландшафтів та вплив кліматичних змін.

4. Використання машинного навчання та штучного інтелекту в обробці супутникових знімків дали змогу підвищує точність і швидкість моніторингу морських акваторій та прибережних зон на 16 відсотків. Це дозволяє автоматично класифікувати об'єкти, виявляти зміни на зображеннях та створювати карти для прийняття стратегічних рішень.

5. Впровадження інформаційних технологій в екологічний моніторинг має особливе значення для України в умовах повоєнного відновлення, адже супутникові платформи дають можливість не лише оцінити масштаби руйнувань і картографувати зруйновані території, а й здійснювати моніторинг природних ресурсів, виявляти забруднення, а також підтримувати гуманітарні ініціативи. Національна політика у сфері захисту морського середовища має адаптуватися до умов воєнного часу, включаючи запровадження систем кризового моніторингу, відновлення і модернізацію зруйнованих гідроспоруд та впровадження екологічних технологій обробки стічних вод.

6. Використання комбінацій оптичних, теплових та радіолокаційних сенсорів дозволяє отримати більш повну картину стану акваторій та прибережних зон. Ефективна інтеграція даних від різних платформ у ГІС-середовищах з



автоматизованою обробкою й аналітикою дозволяє оптимізувати природоохоронні, управлінські та оборонні рішення. У контексті кліматичних змін, воєнних дій та деградації прибережних екосистем супутниковий моніторинг набуває ключового значення для стійкого управління морським середовищем. Сучасна екологічна ситуація в українській частині Чорного моря є надзвичайно складною і вимагає як короткотермінових, так і стратегічних заходів. Національна політика у сфері захисту морського середовища має адаптуватися до умов воєнного часу, включаючи запровадження систем кризового моніторингу, відновлення і модернізацію зруйнованих гідроспоруд та впровадження екологічних технологій обробки стічних вод. Також необхідно інтегрувати супутниковий екологічний моніторинг (з використанням космічних апаратів типу Sentinel, Landsat, Pleiades) для виявлення нових забруднюючих джерел у режимі реального часу. В умовах тривалої війни ефективний екологічний контроль морських акваторій стає не лише складовою стійкого розвитку, а й частиною національної безпеки.

### **РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ НА АЕРОКОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ**

У розділі дисертаційної роботи представлено результати експериментального дослідження точності автоматизованого розпізнавання об'єктів на аерокосмічних знімках із використанням сучасних інформаційних технологій. Основна увага приділена застосуванню методів глибокого навчання для ідентифікації екологічно небезпечних об'єктів і зон забруднення в акваторії Чорного моря. Проведено порівняльний аналіз нейронних мереж YOLOv5, U-Net та DeepLabv3+ з метою оцінки їх ефективності у задачах сегментації плям забруднення, розпізнавання змін берегової лінії та класифікації техногенних аномалій.

Дослідження виконано на основі багаторічних супутникових архівів та даних дистанційного зондування з високим просторовим розрізненням. Встановлено, що використання спеціалізованих архітектур глибокого навчання дозволяє підвищити точність дешифрування до 92,4%, а також значно скоротити час попередньої обробки даних. Проведено тренування моделей на анотованих вибірках, що охоплюють типові ситуації екологічного забруднення (нафтопродукти, замулення, зважені речовини тощо), з урахуванням сезонних і гідрометеорологічних особливостей регіону.

У розділі також обґрунтовано вибір оптимальних структурних параметрів моделей, методи підвищення їх стійкості до шумів та зниження хибнопозитивних розпізнавань. Здійснено інтерпретацію результатів у геоінформаційному середовищі для створення просторово-часових картограм, які можуть застосовуватись у рамках єдиної системи моніторингу морського середовища.

Застосування таких інструментів на практиці створює унікальні можливості для комплексної оцінки антропогенного навантаження, раннього виявлення екологічних загроз та оперативного реагування на надзвичайні ситуації в

морському середовищі.

### **3.1. Інформаційні технології для оцінки екологічного стану морських акваторій**

#### **3.1.1. Технології обробки даних космічного моніторингу водних акваторій у програмно-технологічному комплексі .**

Сучасні екологічні виклики, зокрема зростання антропогенного навантаження на прибережні зони та морські екосистеми, вимагають застосування високотехнологічних рішень для моніторингу та аналізу стану морського середовища. Серед таких рішень особливе місце займають інформаційні технології, що інтегрують методи дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційні системи (ГІС), штучний інтелект (ШІ), Інтернет речей (ІоТ), супутниковий моніторинг та чисельне моделювання. Завдяки їхньому застосуванню стає можливим систематичне, об'єктивне та масштабне спостереження за динамікою стану водних акваторій у просторі й часі.

Інформаційні технології відкривають нові можливості в екологічній оцінці морських регіонів. Використовуючи супутникові знімки високої та надвисокої роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat 8, WorldView, PlanetScope), дослідники отримують доступ до даних щодо таких важливих параметрів, як температура поверхневих вод, концентрація хлорофілу-а, каламутність, наявність нафтопродуктів, фітопланктонна активність, розподіл солоності та температурних аномалій. Однією з головних переваг ДЗЗ є можливість оцінювати ці параметри одночасно на великих площах і в режимі майже реального часу, що робить його незамінним інструментом в умовах глобального кліматичного і техногенного тиску.

Іншим важливим компонентом інформаційної інфраструктури моніторингу морського середовища є геоінформаційні системи (ГІС). Вони забезпечують об'єднання просторових і атрибутивних даних, аналітичну обробку багат шарової

інформації, автоматизовану побудову карт, моделювання просторово-часових змін, створення зон ризику. ГІС-технології дозволяють синтезувати дані з різних джерел: супутникових платформ, безпілотних літальних апаратів (БПЛА), наземних вимірювань, гідрологічних станцій та IoT-сенсорів[51]. На основі геоінформаційного аналізу можливо визначити ділянки потенційного забруднення, просторове поширення екологічних порушень, побудувати прогностичні моделі еволюції акваторій.

У розвинених технологічно країнах активно впроваджуються інтелектуальні системи на основі машинного навчання (ML) та глибокого навчання (DL), які дозволяють автоматично виявляти ознаки забруднень, класифікувати типи порушень (наприклад, нафтова плівка, цвітіння водоростей, зміна кольору вод), прогнозувати їхній розвиток. Такі системи можуть самостійно виявляти закономірності у великих масивах даних, що дозволяє підвищити ефективність прийняття управлінських рішень. Штучний інтелект вже активно застосовується для класифікації супутникових знімків, виявлення об'єктів забруднення, сегментації прибережних ліній, прогнозу сезонних змін у гідрохімічних характеристиках.

Інтернет речей (IoT) вносить нову якість у польові дослідження: системи автономних сенсорів, які розміщуються у воді або на плавучих платформах, можуть у реальному часі вимірювати такі параметри, як рН, концентрація розчиненого кисню, солоність, рівень нітратів і фосфатів, температура та мікропластик. Дані з таких сенсорів надсилаються на сервери через бездротові мережі, де вони аналізуються, інтегруються з супутниковими даними та ГІС-моделями. Така гібридна система дозволяє отримати надзвичайно деталізовану картину змін у морській екосистемі на рівні окремих точок і локальних районів.

Важливим напрямом є математичне моделювання, яке дозволяє не лише оцінювати поточний стан морських акваторій, але й прогнозувати майбутні зміни. Гідродинамічні моделі (наприклад, Delft3D, ROMS, MIKE 21) і моделі

розповсюдження забруднень (GNOME, SWAN) використовуються для оцінки поширення нафтопродуктів, течій, розподілу температур, солоності, а також поведінки забруднюючих речовин у водному середовищі. У поєднанні з реальними даними ДЗЗ і польовими вимірюваннями такі моделі забезпечують глибокий науковий аналіз і можуть стати основою для сценарного моделювання впливу різних факторів — від розливу нафти до зниження біорізноманіття[52].

Окрему увагу слід приділити використанню технологій обробки гіперспектральних зображень, які дозволяють з високою точністю визначати спектральні підписи хімічних речовин, органічного забруднення, водоростей, важких металів. Такі технології розвиваються в рамках супутникових місій (наприклад, PRISMA, EnMAP) і БПЛА-платформ з гіперспектральною камерою. Це відкриває нові горизонти в моніторингу складу води, процесів евтрофікації, впливу нафтогазової промисловості на прибережне середовище.

Інноваційним напрямом, який активно інтегрується в практику морського моніторингу, є створення веб-ГІС порталів та цифрових платформ для інтерактивного аналізу і візуалізації екологічної інформації. В таких системах можна інтерактивно переглядати карти супутникових знімків, виводити часо-просторові графіки, здійснювати запити до баз даних, оцінювати індекси екологічного ризику. Це сприяє не лише підвищенню прозорості екологічного управління, а й розширює доступ громадськості та науковців до екологічної інформації.

Практична реалізація вищезазначених технологій може бути ілюстрована на прикладі моніторингу шельфових зон Чорного та Азовського морів. Наприклад, в районах видобутку вуглеводнів або інтенсивного судноплавства інформаційні технології дозволяють виявляти навіть слабкі сліди забруднень, пов'язаних із витоками нафти, технічними аваріями або перенавантаженням транспортної інфраструктури. Аналітичні індекси — NDWI, NDCI, FAI, TSM — дозволяють в автоматичному режимі моніторити мутність, продуктивність фітопланктону,

температуру, наявність органічного вмісту. Приклад шарів інтерактивної карти природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод Північно-західної частини Чорного моря на рис.3.1, 3.2.

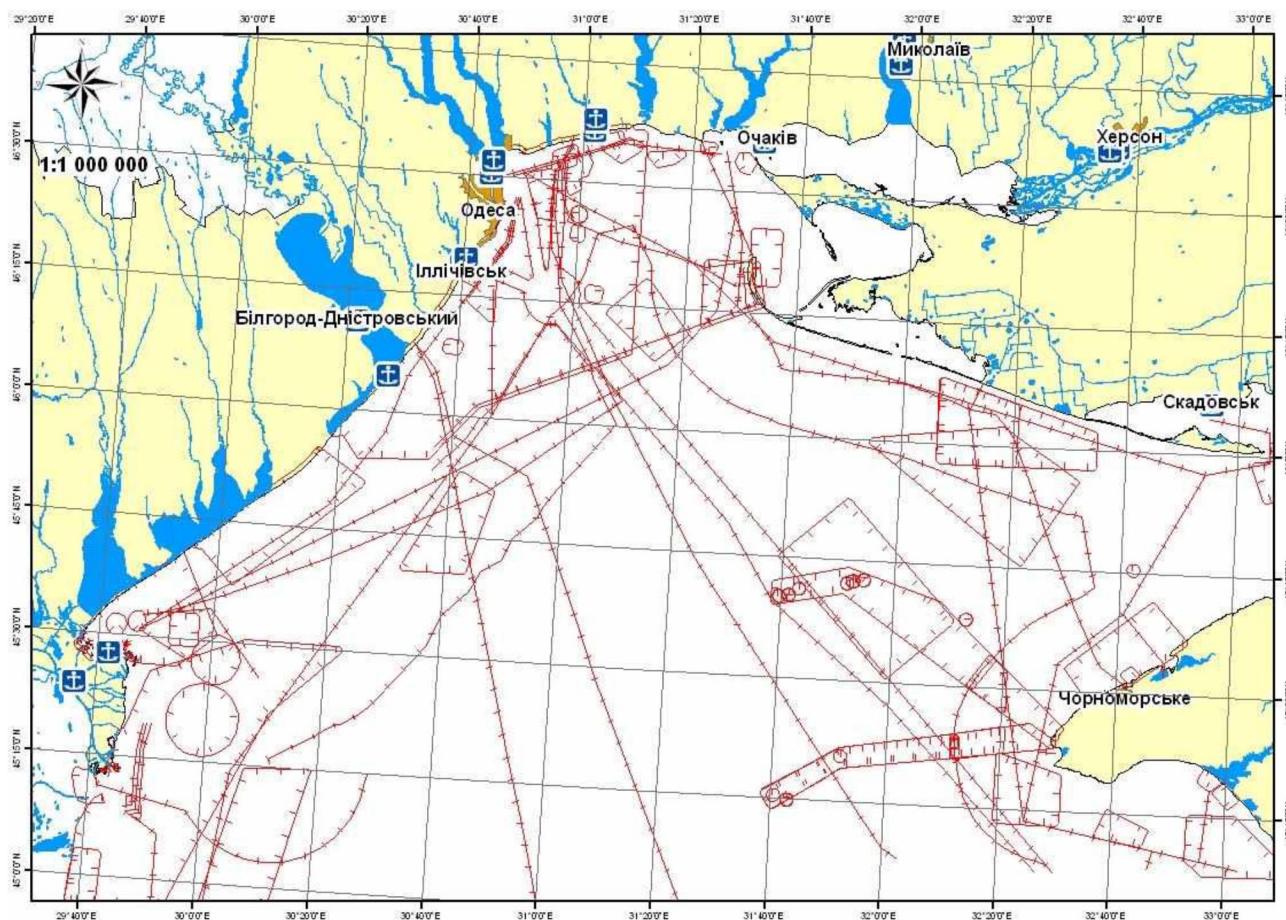


Рис. 3.1. Природні та техногенні чинники забруднення територіальних вод  
Північно-західної частини Чорного моря





Рис. 3.2. Умовні позначення природних та техногенних чинників забруднення територіальних вод Північно-західної частини Чорного моря

Отже, комплексне використання інформаційних технологій дозволяє забезпечити якісно новий рівень оцінки екологічного стану морських акваторій. Їх ефективне впровадження створює передумови для сталого розвитку морських регіонів, збереження біорізноманіття, підвищення безпеки водокористування та оперативного реагування на екологічні катастрофи. У перспективі такі технології мають стати обов'язковим елементом державної системи екологічного моніторингу та прийняття рішень у сфері охорони морського довкілля.

### **3.2. Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація аналізу акваторій моря і прибережних зон**

#### **3.2.1. Автоматизація дешифрування та виявлення об'єктів морської інфраструктури**

У сучасних умовах зростання екологічних загроз, спричинених військовими діями, антропогенним навантаженням та кліматичними змінами, особливого значення набуває використання аерокосмічних знімків із безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон. Застосування БПЛА дає змогу оперативно отримувати високодеталізовану інформацію про зміни берегової лінії, процеси ерозії, скупчення водоростей, нафтопродуктів, сміттєвих шлейфів або наслідки аварійного скиду речовин.

Актуальною проблемою залишається автоматизація дешифрування таких знімків — процесу, що дозволяє виявляти об'єкти морської інфраструктури (ОМІ), зони забруднення або біофізичні аномалії у водному середовищі з високою точністю та оперативністю. Традиційні підходи, засновані на ручній візуалізації оператором, є неефективними в умовах великих обсягів даних та швидкоплинної ситуації.

Для вирішення цієї проблеми запропоновано математичну модель дешифрування, яка базується на алгоритмах комп'ютерного зору та машинного навчання (зокрема нейронних мереж), що забезпечують виявлення цільових об'єктів на аерофотознімках, отриманих над морськими акваторіями. Особливо перспективними є згорткові нейронні мережі (CNN) та моделі типу YOLOv5, здатні обробляти зображення в режимі реального часу навіть за обмежених обчислювальних ресурсів[52].



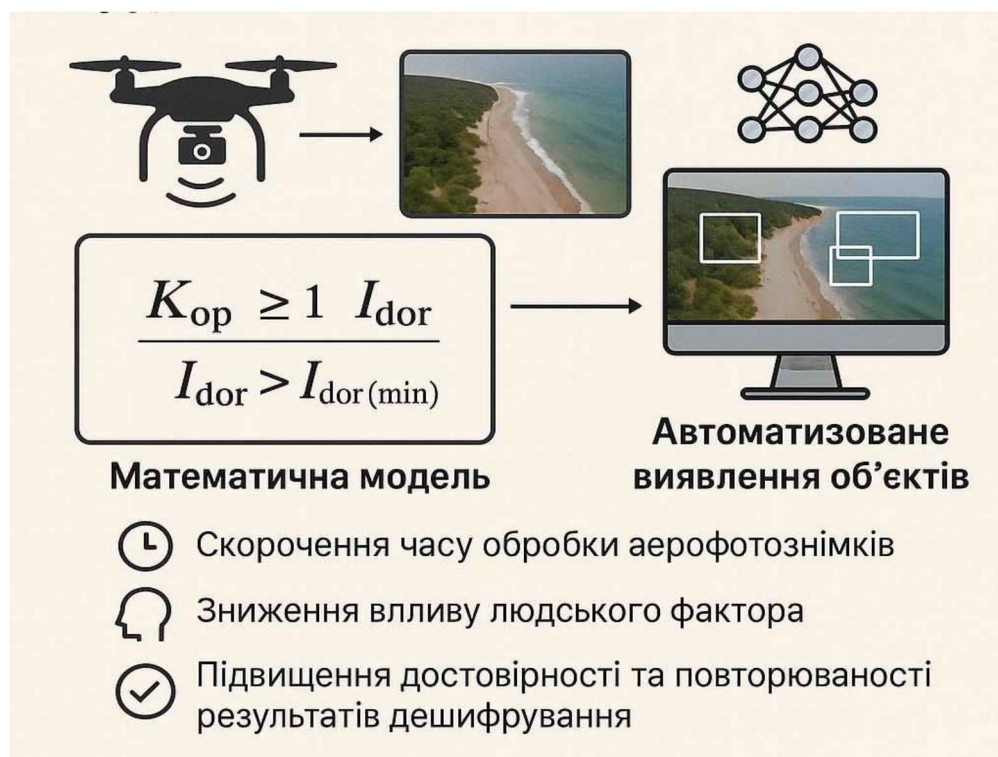


Рис. 3.3. Блок –схема математичної моделі дешифрування аерофотознімків морських акваторій та прибережних зон.

### 3.2.2. Інструменти дешифрування аерофотознімків, отриманих із безпілотних літальних апаратів

У зв'язку з актуальністю екологічного моніторингу прибережних територій і морських акваторій, особливо на тлі зростання техногенного навантаження, морського судноплавства та воєнних дій, виникає необхідність створення ефективних автоматизованих інструментів дешифрування аерофотознімків, отриманих із безпілотних літальних апаратів. Використання БПЛА у поєднанні з інтелектуальними алгоритмами аналізу зображень дозволяє суттєво покращити якість і оперативність виявлення ключових об'єктів морської інфраструктури, зон забруднення, змін у береговій лінії, осередків евтрофікації та розливів нафтопродуктів.

Запропонована математична модель передбачає багаторівневу обробку

зображень, зібраних з морських та прибережних ділянок, і базується на принципах комп'ютерного зору, машинного навчання та глибоких нейронних мереж. Її функціональність полягає в автоматичному виявленні цільових екологічно значущих об'єктів на знімках морських просторів, уникаючи затримок, властивих традиційним ручним методам дешифрування.

Основною метою розробки такої моделі є забезпечення високого рівня оперативності аналізу аерофотознімків прибережних екосистем без втрати точності та достовірності результатів. Це особливо важливо в умовах інтенсивних змін, пов'язаних з аварійними скидками забруднюючих речовин, руйнуванням гідротехнічної інфраструктури або поширенням біологічних загроз (наприклад, цвітіння води, інвазійні види тощо).



Рис. 3.4. Етапи дешифрування аерознімків для морських акваторій та прибережних зон

### 3.2.3. Етапи моделювання векторизації контурів виділених ділянок

Побудова моделі включає три логічно послідовні етапи:

**Етап 1.** Формування навчальної вибірки. На першому етапі здійснюється

збирання та систематизація репрезентативного набору аерофотознімків, які містять приклади типових прибережних об'єктів (берегові укріплення, дамби, пляжі, гірля річок, порти, риболовецькі споруди) та зон техногенного або природного забруднення (нафтова плівка, скиди відходів, мулисте замулення, шлейфи зважених речовин). Цей етап потребує залучення джерел з високою роздільною здатністю, включно з БПЛА (DJI Mavic, Autel EVO) та супутниковими даними (Sentinel-2, Landsat 8), які будуть використані для формування навчальної вибірки.

Зібрані знімки піддаються процесу анотування – кожен об'єкт, що підлягає розпізнаванню, позначається за допомогою міток (bounding boxes) і класифікується за типом. Аргументація даних застосовується для збільшення обсягу вибірки шляхом масштабування, повороту, дзеркального відображення та зміни освітлення. Для цього доцільно використовувати платформу Roboflow, яка дозволяє гнучко адаптувати набори зображень до вимог моделей комп'ютерного зору.

**Етап 2.** Навчання нейронної мережі. Другий етап полягає у навчанні згорткової нейронної мережі (CNN), орієнтованої на задачі детекції та класифікації об'єктів на аерофотознімках морського середовища. Найефективнішими в цьому контексті є моделі типу YOLOv5/YOLOv8, які забезпечують високу швидкодію та достатню точність розпізнавання при помірному використанні ресурсів.

Модель навчається у середовищах TensorFlow або PyTorch, що дозволяє реалізувати як локальне, так і хмарне навчання з підтримкою GPU. Під час навчання здійснюється оптимізація гіперпараметрів: розміру батча, кількості епох, коефіцієнтів регуляризації тощо. Навчання триває до досягнення встановлених метрик точності (accuracy) та повноти (recall), які контролюються через метрики ефективності. Однією з ключових вимог до моделі є мінімізація часу обробки вхідного зображення для виявлення об'єктів. Це формалізується наступною умовою, що відображає коефіцієнт оперативності дешифрування ( $K_{оп}$ ):

$$K_{оп} = T_{еталон}$$

$T_{\text{факт}}$

де:

$T_{\text{еталон}}$  — еталонний (мінімально допустимий) час на виявлення ОМІ на аерофотознімку;

$T_{\text{факт}}$  — фактичний час, витрачений запропонованою математичною моделлю на виявлення об'єктів.

Для забезпечення необхідної швидкодії, повинна виконуватися умова ефективності, коефіцієнт оперативності дешифрування повинен бути не меншим за одиницю, тобто:  $K_{\text{оп}} \geq 1$ .

Високий рівень точності та достовірності ідентифікації об'єктів відображає відсоткове співвідношення правильно розпізнаних об'єктів до загальної кількості об'єктів, поданих для дешифрування.

Розрахунок ведеться за формулою, що визначає індекс достовірності розпізнавання ( $I_{\text{дор}}$ ):

$$I_{\text{дор}} = \frac{N_{\text{виявл\_прав}}}{N_{\text{заг\_об'єктів}}}$$

де:

$N_{\text{виявл\_прав}}$  — кількість об'єктів моря та прибережних зон, коректно ідентифікованих математичною моделлю на тестових аерофотознімках;

$N_{\text{заг\_об'єктів}}$  — загальна кількість об'єктів моря та прибережних зон, представлених на тестових аерофотознімках.

Для забезпечення високого рівня достовірності, також повинна виконуватися умова ефективності, де індекс достовірності розпізнавання має перевищувати або дорівнювати встановленому мінімально допустимому порогу ( $I_{\text{дор}}(\text{мін})$ ), що визначається специфікою завдань моніторингу, тобто:  $I_{\text{дор}} \geq I_{\text{дор}}(\text{мін})$ .

**Етап 3.** Тестування та валідація моделі. На завершальному етапі модель проходить тестування на незалежній вибірці зображень, отриманих з інших районів

акваторії або за інший період. Це дозволяє перевірити її здатність узагальнювати знання та зберігати точність у нових умовах зйомки.

Такий підхід сприятиме забезпеченню відповідності процесу дешифрування наступним ключовим вимогам:

Підвищення швидкодії ідентифікації ОМІ, що оцінюється коефіцієнтом прискорення дешифрування ( $K_{пр}$ ):

$$K_{пр} = \frac{T_{існуючий\ метод}}{T_{автоматизований\ ме}} \quad (1)$$

де:

$T_{існуючий\ метод}$  — середній час, необхідний для дешифрування об'єктів за допомогою традиційних (існуючих, наприклад, ручних) методів;

$T_{автоматизований\ метод}$  — час, витрачений на дешифрування тих самих об'єктів із використанням запропонованого автоматизованого методу.

Зазначимо, що актуальність цієї вимоги зумовлена суттєвими часовими витратами на аналітичну обробку зображень при використанні класичних методів, що у ряді випадків призводить до втрати оперативності отриманих даних.

Досягнення заданого рівня достовірності виявлення ОМІ, що характеризується коефіцієнтом підвищення достовірності ( $K_{дост}$ ):

$$K_{дост} = \frac{D_{нв}}{D_{цільової}} \quad (2)$$

де:

$D_{нв}$  — досягнутий рівень достовірності розпізнавання ОМІ запропонованою математичною моделлю (у відсотках від 1);

$D_{цільової}$  — мінімально допустимий або бажаний рівень достовірності, встановлений для завдань моніторингу.

Значущість дотримання зазначених вимог є надзвичайно високою, адже сьогодні процес дешифрування аерофотознімків залишається складним, ресурсоємним і таким, що потребує значних часових витрат. Це, у свою чергу,

обумовлює затримки у надходженні аналітичної інформації та знижує її цінність для оперативного реагування, що особливо критично в умовах швидкозмінного середовища, зокрема в прибережних та урбанізованих зонах.

Розв'язання цієї проблеми передбачається за рахунок інтеграції сучасних методів комп'ютерного зору у процедури дешифрування. Такий підхід ґрунтується на можливостях штучного інтелекту автоматично і з високою швидкістю розпізнавати об'єкти морської інфраструктури та аномалії на зображеннях. Водночас якість і продуктивність таких систем істотно залежать від наповненості та структурованості навчального набору даних — чим більший і точніше маркований масив зразків цільових об'єктів, тим вища ймовірність точного виявлення їх на нових зображеннях.

Як правило, для побудови таких систем застосовуються згорткові нейронні мережі, що поєднуються з методами машинного навчання. У цьому контексті особливо ефективними виявились моделі серії YOLO (You Only Look Once), які завдяки своїй швидкодії, точності та невибагливості до ресурсів стали одними з провідних рішень для задач реального часу. [53]

Особливий інтерес становлять моделі п'ятого покоління та їх модифікації, що демонструють низку важливих переваг: високу швидкість обробки, інтуїтивно зрозумілу реалізацію та низькі апаратні вимоги. Їхня ефективна інтеграція забезпечується за допомогою таких платформ, як PyTorch — відомий своєю компактністю, гнучкістю та ефективним використанням пам'яті, а також TensorFlow, що відзначається широкими можливостями масштабування, підтримкою багатопроцесорних середовищ та хмарних рішень.

З урахуванням результатів численних досліджень та практичних застосувань, можна з упевненістю стверджувати, що алгоритми родини YOLO становлять перспективний інструментарій для автоматизованого аналізу зображень і заслуговують на впровадження у системи дешифрування аерофотознімків морських акваторій.

### 3.2.4. Фізичні принципи формування інформаційного сигналу при дистанційному зондуванні морських акваторій

Ефективність традиційних контактних методів спостереження за якістю поверхневих вод значно підвищується завдяки впровадженню супутникових технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [54]. Для задач, пов'язаних з екологічним контролем морських акваторій, ці технології забезпечують: • масштабну оглядовість і отримання оперативної інформації щодо стану морських вод на великих територіях; • можливість трансформації точкових спостережень у безперервну просторову картину розподілу параметрів; • доступ до важкодоступних або віддалених районів.

Основою супутникового моніторингу морських акваторій є методи реєстрації власного та відбитого електромагнітного випромінювання у трьох основних діапазонах: оптичному, інфрачервоному (ІЧ) і надвисокочастотному (НВЧ).

В оптичному спектрі світловий потік від поверхні води включає два компоненти: дзеркальне відбиття на межі «повітря–вода» та дифузне випромінювання з-під поверхні. Перша складова визначається коефіцієнтом дзеркального відбиття (КДзВ), друга — коефіцієнтом дифузного відбиття (КДВ). КДзВ залежить від стану поверхні води, її властивостей та оптичного показника заломлення, а також наявності хвиль, піни, нафтопродуктів та інших поверхневих аномалій.

Основні задачі екологічного спостереження включають виявлення нафтових плівок і зон із підвищеною концентрацією завислих органічних або мінеральних речовин. Виявлення нафтопродуктів базується на контрасті спектрального коефіцієнта відбивання між фоновою водою  $R_{\text{ф}}(\lambda)$  і нафтовим покриттям  $R(\lambda)$ :  $K(\lambda) = (R(\lambda) - R_{\text{ф}}(\lambda)) / R_{\text{ф}}(\lambda)$ .

У візуальному діапазоні нафта відбиває більше світла, ніж вода, при цьому на знімках плівки виглядають світлішими, особливо при наявності інтерференційних

ефектів. Ці ефекти змінюються залежно від товщини плівки й викликають чергування світлих і темних смуг на периферії плям.

Дифузне відбиття (КДВ) залежить від гідрооптичних параметрів: коефіцієнтів ослаблення ( $\alpha$ ), розсіювання ( $\beta$ ), поглинання ( $\kappa$ ) та індикатриси розсіювання. Ці параметри залежать від природи та кількості завислих частинок у воді. Спектральне поглинання води зростає з довжиною хвилі, зумовлюючи спад КДВ у напрямку від синьої до ІЧ-зони.

Для фітопланктону характерні піки поглинання хлорофілу-а ( $\lambda_1 = 430$  нм,  $\lambda_2 = 675$  нм), які можуть виявлятися в спектрі при високій концентрації пігментів. У дуже каламутній воді залишаються лише окремі спектральні особливості. Для оцінки вмісту хлорофілу потрібні сенсори з високою спектральною роздільною здатністю.

Багатозональні зйомки, які часто використовуються при ДЗЗ, фіксують загальні зміни в інтенсивності, проте не завжди дозволяють виявити вузькоспектральні особливості. У водах з низьким вмістом завислих речовин основним фактором залишається поглинання світла самою водою, що впливає на глибину формування сигналу.

ІЧ-випромінювання дозволяє вимірювати температуру поверхневого шару води (до 0,02 мм глибини) згідно з функцією Планка. Цей шар часто має іншу температуру, ніж нижні горизонти. ІЧ-відбиття залежить від наявності плівок, піни та альbedo. В ІЧ-спектрі плівки нафти підвищують випромінювання за рахунок зміни теплового балансу, уповільнення випаровування, зменшення теплопровідності та пригнічення хвиль. Сумарно це може призвести до зростання або зниження яскравісної температури залежно від погодних умов, товщини плівки й часу після виливу.

У НВЧ-діапазоні реєструються ефективна площа розсіювання (ЕПР) і радіояскравісна температура (Тя). Ці показники залежать від стану хвиль і діелектричних властивостей води, зокрема від температури та солоності.



Комплексна діелектрична проникність води  $\epsilon_u = \epsilon_{u1} + i\epsilon_{u2}$  змінюється із солоністю і частотою. На довгохвильових частотах  $\epsilon_{u2}$  сильно зростає з підвищенням солоності.

Нафтова плівка зменшує дрібнохвильове збурення, відповідно знижуючи ЕПР при великих кутах огляду. Збільшення вітру навпаки підсилює хвилювання, що підвищує Т<sub>я</sub>. На Т<sub>я</sub> також впливають інтерференційні ефекти, особливо при відношенні товщини плівки до довжини хвилі  $h/\lambda \approx 0,15$ . Якщо плівка трансформується в емульсію, контраст знижується.

Отже, при активному НВЧ-зондуванні провідним чинником є хвильовий режим, зумовлений вітром, плівками, рельєфом дна. У пасивному НВЧ-моніторингу домінують температура, солоність і наявність поверхневих забруднень. При  $\lambda > 30$  см зростає чутливість до солоності. Таким чином, фізичні параметри відбитого або власного сигналу формуються під сукупним впливом оптичних, хімічних, теплових і механічних властивостей водного середовища.

Ефективність традиційних контактних методів спостереження за якістю поверхневих вод значно підвищується завдяки впровадженню супутникових технологій дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) [55]. Для задач, пов'язаних з екологічним контролем морських акваторій, ці технології забезпечують: • масштабну оглядовість і отримання оперативної інформації щодо стану морських вод на великих територіях; • можливість трансформації точкових спостережень у безперервну просторову картину розподілу параметрів; • доступ до важкодоступних або віддалених районів. Основою супутникового моніторингу морських акваторій є методи реєстрації власного та відбитого електромагнітного випромінювання у трьох основних діапазонах: оптичному, інфрачервоному (ІЧ) і надвисокочастотному (НВЧ).

Таблиця 3.1. Основні параметри та діапазони дистанційного зондування морських вод

| Діапазон               | Реєстрований сигнал                    | Основні характеристики | Переваги для моніторингу                 |
|------------------------|----------------------------------------|------------------------|------------------------------------------|
| <b>Оптичний (VIS)</b>  | Відбите сонячне світло (КДзВ, КДВ)     | 400–700 нм             | Виявлення нафтових плівок, фітопланктону |
| <b>ІЧ (IR)</b>         | Власне теплове випромінювання поверхні | 3–11 мкм               | Визначення температури, виявлення плівок |
| <b>НВЧ (microwave)</b> | Радіояскравісна температура, ЕПР       | 1–30 см                | Дослідження хвиль, солоності, плівок     |

### 3.2.5. Формування сигналу дистанційного зондування морських вод

Сигнал дистанційного зондування морських вод формується через низку фізичних процесів, що включають взаємодію сонячного випромінювання з водною поверхнею, відбиття та розсіювання електромагнітних хвиль, а також вплив різноманітних природних факторів.

#### Схема формування сигналу дистанційного зондування морських вод

[Сонячне випромінювання] → [Взаємодія з поверхнею моря] → → [КДзВ] — відбиття на межі «повітря–вода» → [КДВ] — розсіювання у воді (завислі речовини, пігменти) → [ІЧ-випромінювання] — сигнал про температуру поверхні → [НВЧ-сигнал] — залежить від солоності, плівок, вітру → [Супутниковий сенсор] → [Інтерпретація даних]

Сонячне випромінювання. Початкове джерело сигналу — це сонячне випромінювання, яке досягає водної поверхні. Частина цього випромінювання відбивається від поверхні моря, а частина проникає в товщу води, де вона взаємодіє з різними елементами водного середовища.

Взаємодія з поверхнею моря. Випромінювання, що досягає водної поверхні, взаємодіє з її фізичними та хімічними характеристиками. Це може включати відбиття світла, поглинання та розсіювання хвиль на межі «повітря–вода», що значною мірою залежить від стану водної поверхні (хвилювання, наявність

нафтових плівок, снігу, льоду тощо).

Коефіцієнт дзеркального відбиття (КДзВ). Відбиття сонячного випромінювання на межі «повітря–вода» описується коефіцієнтом дзеркального відбиття. Це важлива характеристика, яка визначає інтенсивність відбитого сигналу, що потім використовується для аналізу стану водної поверхні.

Коефіцієнт дифузного відбиття (КДВ). Водне середовище також викликає дифузію світлових хвиль, що розсіюються в воді через присутність завислих частинок, органічних та неорганічних речовин (наприклад, пігментів фітопланктону, мікроскопічних часток). Це розсіювання світла викликає зниження інтенсивності сигналу, що реєструється супутниковими сенсорами[56].

ІЧ-випромінювання. Часть сонячного тепла, що поглинається водною поверхнею, випромінюється у вигляді інфрачервоного (ІЧ) випромінювання. Це випромінювання залежить від температури поверхневих шарів води і є важливим параметром для оцінки температурних аномалій, зміни кліматичних умов, а також для моніторингу термальних забруднень.

НВЧ-сигнал. Низькочастотні радіохвилі (НВЧ), що використовуються в радарних системах, мають свою особливість — вони взаємодіють з водною поверхнею залежно від солоності води, наявності поверхневих плівок (наприклад, нафтових) і інтенсивності вітру. Ці фактори значно впливають на характеристики відбитого сигналу.

Супутниковий сенсор. Спеціалізовані сенсори на супутниках захоплюють всі ці сигнали (відбиті, розсіяні, інфрачервоні та радіохвилі) і передають їх на Землю для подальшої обробки. Сенсори, такі як ті, що працюють в межах спектральних діапазонів, дозволяють здійснювати точний моніторинг морських акваторій та прибережних зон, а також оцінювати фізичні та хімічні характеристики водного середовища.

Інтерпретація даних. Отримані з супутникових сенсорів дані підлягають інтерпретації для виявлення екологічних змін, таких як забруднення води, зміна

температури, оцінка біопродуктивності та інші параметри, що мають важливе значення для управління природними ресурсами, екологічної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Ця схема дозволяє здійснювати комплексний аналіз морських вод, використовувати супутникові технології для моніторингу їх стану та виявлення потенційних екологічних загроз.

### **3.3. Моделювання антропогенних забруднень у акваторіях Чорного та Азовського морів за супутниковими знімками**

#### **3.3.1. Топографічна основа для картографування екологічного стану акваторій**

Сучасні геоінформаційні технології надають принципово нові можливості для прийняття рішень у сфері охорони навколишнього середовища. Завдяки використанню засобів ГІС для візуалізації геопросторових даних забезпечується інтеграція різнорідних баз даних у єдине об'єктно-орієнтоване інформаційне середовище. Незважаючи на складність побудови багаторівневих запитів у системах підтримки прийняття рішень, перевагою є зручне та наочне подання результатів.

Проблемно-орієнтовані ГІС, розглянуті у працях [57], уже підтвердили свою ефективність у вирішенні завдань охорони природи та управління природними ресурсами. ГІС, що створюється в межах цієї науково-дослідної роботи, розроблена як інструмент підтримки екологічної безпеки для акваторій Чорного та Азовського морів. Структура її інформаційної бази визначається характером прикладних задач і орієнтована на виявлення нових закономірностей взаємодії природних і антропогенних систем.

Формування геоінформаційного фонду здійснювалося з урахуванням специфіки екологічного моніторингу морських акваторій. Геомодель місцевості та

водної поверхні базується на існуючих картографічних матеріалах, офіційній статистиці та результатах польових досліджень і вимірювань.

Інформація представлена в таких форматах:

растровому – у вигляді супутникових знімків (актуальних і архівних), а також сканованих і оцифрованих тематичних карт;

векторному – у вигляді окремих тематичних шарів, створених у середовищі ArcGIS;

текстовому – у вигляді баз даних з таблицями статистичних та тематичних відомостей (середовище Access);

графічному – у вигляді діаграм, графіків, умовних позначень.

Синтез геоінформаційної системи для підтримки рішень у сфері екологічного управління північно-західною ділянкою Чорного моря реалізовано на основі програмного середовища ArcGIS 9.2.

Ключові особливості побудованої моделі:

1.Первинні картографічні дані оцифровані та приведені до єдиної системи координат, що забезпечує узгодження електронних топографічних основ і карт глибин у векторному форматі.

2.Запроваджена ієрархічна модель, у якій інформація розподіляється за масштабами відповідно до топографічної сітки досліджуваної території. Такий підхід дає змогу оперативно здійснювати вибірку й комбінування даних різної деталізації. Кожна одиниця просторового поділу (відповідно до масштабу) має унікальний код, і координати її вершин фіксуються відповідно до обраної проекції.

3.Кожен векторний шар моделі має власну базу даних, що містить атрибутивну інформацію та опис умовних позначень із визначеним графічним форматом (кольори, символи, текстури).

4.Основу моделі складає топографічна база, створена на основі системи координат Пулково-2012, з використанням оцифрованих топографічних карт масштабу 1:200 000, що трансформовані з високою точністю.

### 3.3.2. Ознаки дешифрування забруднень морських акваторій на знімках оптичного діапазону

Антропогенне забруднення морського середовища переважно зумовлюється впливом таких чинників, як річковий і береговий стік, підйом донних відкладень, абразійні процеси, а також витоки нафти та нафтопродуктів різного походження. Найбільшої концентрації забруднення зазнають прибережні води, що зумовлює потребу в ефективному екологічному моніторингу з оперативним виявленням типів забруднень, їх генезису та наслідків. Одним з ефективних інструментів у цій сфері є тематичне дешифрування супутникових знімків оптичного діапазону(рис.3.5.).



Рис.3.5. Забруднення Чорного моря річковим стоком

Процес дешифрування передбачає як візуальний, так і автоматизований аналіз, у якому використовуються ознаки, що відображають просторові, спектральні та текстурні характеристики об'єктів[58]. Первинне візуальне дешифрування здійснюється шляхом логічного аналізу зображень на основі комплексу ознак і залучення апіорної інформації: результатів попередніх дешифрувань, картографічних джерел, літературних

даних, відомчих матеріалів, а також опорних супутникових спостережень.



Рис. 3.6.Забруднення Чорного моря береговим стоком



Рис.3.7 Цвітіння фітопланктону на Чорному морі (яскраві ділянки)

Антропогенні джерела забруднення морських акваторій включають річковий і береговий стік, підйом донних відкладень, абразію берегової лінії та витоки нафти



й нафтопродуктів різного походження(рис.3.6-3.7.). Найвищий рівень забруднення спостерігається в прибережній зоні, що обумовлює необхідність постійного моніторингу та оперативного виявлення типів і джерел забруднень.

Одним із ключових інструментів спостереження за станом морських акваторій є тематичне дешифрування супутникових знімків у видимому й ближньому інфрачервоному діапазонах. Такий аналіз здійснюється як візуально, так і автоматизовано з використанням структурних і яскравісних ознак.

Візуальне дешифрування базується на логічному аналізі зображень із залученням апріорної інформації, включаючи картографічні, літературні та відомчі джерела, а також результати попередніх досліджень. У свою чергу, автоматизоване дешифрування ґрунтується на формалізації ознак, що дозволяє проводити кількісну оцінку.

### **3.3.3. Дешифрувальні ознаки для моделювання**

Дешифрувальні ознаки поділяються на дві групи яскравісні та структурні. Яскравісні ознаки – це фототон (у чорно-білих знімках), кольоровий тон, насиченість і світлота (для спектрональних зображень), цифрові значення яскравості або зональної яскравості. Їх використовують для оцінки прозорості вод, концентрації зважених частинок тощо. Структурні ознаки – охоплюють геометричні параметри об'єктів (форма, розмір, контур), характер текстури, просторовий розподіл яскравості, що особливо ефективно в умовах високої роздільної здатності. Комплексне застосування цих ознак дозволяє достовірно ідентифікувати різні типи забруднень. Наприклад, підвищена яскравість води поблизу джерела скиду може свідчити про зростання концентрації зважених речовин. Відмінні текстурні характеристики та геометрія плями дають змогу відрізнити забруднення від природних процесів (мілководдя, евтрофікація, цвітіння води). Для автоматизованої інтерпретації структурних ознак застосовуються



математичні перетворення, зокрема спектральний аналіз розподілу яскравості, формалізація контурів та статистичні характеристики гістограм яскравості (середнє, дисперсія, ентропія, асиметрія). Додаткові параметри, такі як медіанні значення яскравості або локальні середні, дозволяють підвищити точність аналізу(табл.3.2.)

**Таблиця 3. 2.Типові ознаки забруднень морських акваторій**

| <b>Тип джерела забруднення</b> | <b>Яскравісні ознаки</b>              | <b>Структурні ознаки</b>                  | <b>Коментарі</b>                                     |
|--------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Річковий стік                  | Підвищена яскравість поблизу гирла    | Розмиті плями, напрямом уздовж течії      | Впізнавані за положенням відносно гирла річки        |
| Нафтопродуктові розливи        | Темні або світлі плями чіткими межами | Витягнуті іноді із закрученою текстурою   | Часто спостерігаються поблизу судноплавних маршрутів |
| Абразія берегів                | Підвищена мутність біля берегів       | Плямистість із нерівномірною текстурою    | Активізується при штормовій погоді                   |
| Евтрофікація/цвітіння          | Зеленуваті або бірюзові зони          | Тонка волокниста текстура, гладкі контури | Вказує на надлишок біогенних елементів               |

Дешифрувальні ознаки, які застосовуються для виявлення забруднень, поділяються на дві ключові групи — яскравісні та структурні. До яскравісних ознак належать фототон, колір, насиченість і світлота для спектрально-зональних, кольорових і синтезованих зображень, а також значення яскравості у відповідних зонах спектра для цифрових знімків. При використанні багатозональних матеріалів із синтезом у штучних кольорах до яскравісних ознак також належать характеристики кольорового відображення.

Структурні ознаки включають геометричні параметри об'єктів, форму й

розміри плям, характер розподілу яскравості, тип текстури. Вони особливо важливі при аналізі знімків із високою просторовою роздільністю, де дозволяють ідентифікувати не лише самі джерела забруднення, але й оцінити їхній вплив на навколишнє середовище.

Яскравісні характеристики, зокрема рівень яскравості водної поверхні, часто використовуються для оцінки ступеня каламутності. При аналізі матеріалів із низькою роздільністю роль таких ознак зростає. Водночас структурні ознаки дозволяють виявити різні типи джерел забруднення та їх специфічні ознаки. Наприклад, підвищена яскравість води поблизу точкового джерела може свідчити про присутність зважених речовин, а характерні контури й текстура — допомогти відрізнити ці зони від природних явищ, таких як мілководдя чи «цвітіння» води.

У комп'ютерній обробці знімків застосовується числова формалізація ознак. Яскравісні параметри можуть бути представлені у вигляді середніх значень, медіан, статистичних характеристик гістограм (середнє, дисперсія, ентропія, асиметрія тощо). Для структурних ознак застосовуються спектральні та морфометричні методи: аналіз розподілу яскравості в частотній області, оцінка параметрів форми контурів і текстурних моделей.

У більшості випадків для підвищення достовірності розпізнавання використовують комплексне поєднання структурних і яскравісних ознак. Наприклад, при ідентифікації плям забруднення, спричинених скидами речовин із підвищеною мутністю, використовують як яскравість плями, так і її текстуру та геометричну конфігурацію. Форма плями, її положення щодо берегової лінії та характер текстури забезпечують додаткову інформацію про джерело забруднення.

Таким чином, кожен тип забруднення характеризується унікальним набором дешифрувальних ознак, зокрема формою, розмірами й текстурою плями на морській поверхні. Це дозволяє з високим ступенем точності проводити ідентифікацію джерел забруднення та здійснювати якісну оцінку екологічного стану акваторії.

### **3.3.4. Аналіз характерних проявів антропогенних забруднень у акваторіях Чорного та Азовського морів за супутниковими знімками**

Найпоширенішими видами антропогенного впливу на морські акваторії Чорного та Азовського морів є точкові та дифузні джерела забруднення[59]. До точкових джерел належать промислові та комунальні скиди, а також гирла забруднених річок. Їх візуальне виявлення на супутникових знімках (як у чорно-білому, так і у видимому спектральному каналі) ґрунтується на фіксації зон аномальної яскравості, які чітко прилягають до джерел скиду. Найбільше відхилення яскравісних характеристик від фонових значень спостерігається безпосередньо в районі джерела викиду. Залежно від оптичних властивостей забруднюючих речовин, яскравість зони забруднення може бути як підвищеною (у випадку світлорозсіювальних суспензій), так і зниженою (якщо домінують речовини з високими поглинальними властивостями) [60,61]. Просторова форма поширення таких викидів часто має форму факело- або пелюсткоподібного шлейфу, орієнтованого за напрямом течії. До дифузних джерел забруднення належать поверхневий стік із сільськогосподарських угідь, абразійні процеси берегової зони, а також розмиви відмілин. Їх виявлення можливе завдяки відмінностям концентрацій зважених речовин між забрудненими та фоновими водами. Зазвичай у зонах дифузного впливу спостерігається вища концентрація зважених часток, що призводить до зміни характеристик дифузного відбиття сонячного випромінювання від водної поверхні. Ці ділянки на супутникових знімках візуалізуються як зони із підвищеною або зниженою яскравістю, що дозволяє їх надійно ідентифікувати навіть за допомогою візуального дешифрування з використанням яскравісних і текстурних ознак. Однією з характерних текстурних ознак є форма плями, яка зазвичай має округлу або витягнуту конфігурацію вздовж напрямку поширення джерела забруднення.

Моніторинг процесів евтрофікації здійснюється шляхом аналізу варіацій

коефіцієнта дифузного відбиття світла від поверхневих і підповерхневих шарів води, що змінюється залежно від концентрації фітопланктону [34]. Текстуною ознакою евтрофікації є ниткоподібна або мозаїчна структура зображення, яка характерна для зон інтенсивного «цвітіння» води. Характерні ознаки забруднень, притаманні акваторіям Чорного та Азовського морів, були ідентифіковані на основі аналізу великої кількості супутникових знімків, що відображають різні типи забруднень. Триває робота з формалізації та виділення штучних (машиночитаних) ознак з метою автоматизації процесів класифікації типів забруднень.

Побудова гіпотез щодо природи спостережуваних плям на морській поверхні базується на систематичному аналізі дешифрувальних ознак. Найтиповіші з них для акваторій Чорного й Азовського морів узагальнено в таблиці 2.7 [35]. З урахуванням накопиченого досвіду тематичного аналізу супутникових даних було визначено перелік найбільш інформативних природних ознак, що дозволяють здійснювати диференціацію типів забруднення, характерних для зазначених морських басейнів.

### **3.4. Методика автоматизованого оконтурювання плям морських акваторій на цифрових супутникових знімках**

#### **3.4.1. Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки**

У практиці морського моніторингу ефективним інструментом є побудова картографічних моделей плямистості акваторій, що дають змогу виявляти джерела забруднення, визначати масштаби й динаміку змін, а також здійснювати об'єктивну оцінку екологічного стану певних територій або їх окремих ділянок [36].

Картографування плям забруднення передбачає реалізацію алгоритмів розпізнавання, що дозволяють класифікувати кожен елемент зображення  $S_p$  на супутниковому знімку за одним із наперед заданих класів якості води. Для

ефективної ідентифікації морського забруднення враховуються такі чинники:

- локалізація і природа джерел забруднення;
- відхилення фототону від фонового значення;
- структура текстури зображення;
- форма контурів плям;
- топографічні характеристики прибережних урбанізованих зон [58].

Кожна виявлена пляма має бути віднесена до одного з визначених класів. Для цього формують класифікатор – правило, за яким елемент зображення, описаний вектором параметрів, можна віднести до конкретного класу. Побудова такого класифікатора виконується на основі навчальних вибірок, сформованих із пікселів з відомою класовою приналежністю, визначеною шляхом попереднього візуального дешифрування. Ця задача вирішується в рамках теорії розпізнавання образів шляхом навчання класифікаційної моделі [58]. У ролі класифікатора, як правило, виступає функція від вектора параметрів – вирішальна або дискримінантна функція. Вона використовується для прийняття рішень щодо належності пікселя до того чи іншого класу. Оптимальною вважається така функція, яка мінімізує ймовірність помилкової класифікації. Параметри вектора включають набори ознак, характерні для різних типів забруднення. У контексті супутникового моніторингу до них належать як природні, так і штучні дешифрувальні ознаки. Важливим етапом тематичного аналізу є векторизація ділянок із аномальними яскравісними характеристиками. З цією метою було створено програму Sea Image Processor (IMPROC) для візуалізації та обробки супутникових знімків морської поверхні. Її мета – підвищення ефективності виділення та аналізу аномалій без втрати якості зображення.

Аналіз контрастів дозволяє розв'язувати практичні завдання дистанційного контролю екологічного стану територій [60]. Основні джерела забруднення зазвичай відомі, однак масштаби їх впливу змінюються залежно від обсягів, ступеня

очищення та просторової динаміки процесів. Це потребує оконтурювання плям, де спектральні характеристики яскравості виходять за межі встановлених нормативних значень.

У роботі розроблено алгоритм автоматизованої векторизації меж забруднених ділянок (рис. 3.8.).

Таким чином, запропонована методика автоматизованого оконтурювання та векторизації забезпечує підвищену точність і об'єктивність в оцінюванні параметрів забруднення на основі супутникових знімків, із перспективою інтеграції у сучасні ГІС-платформи.

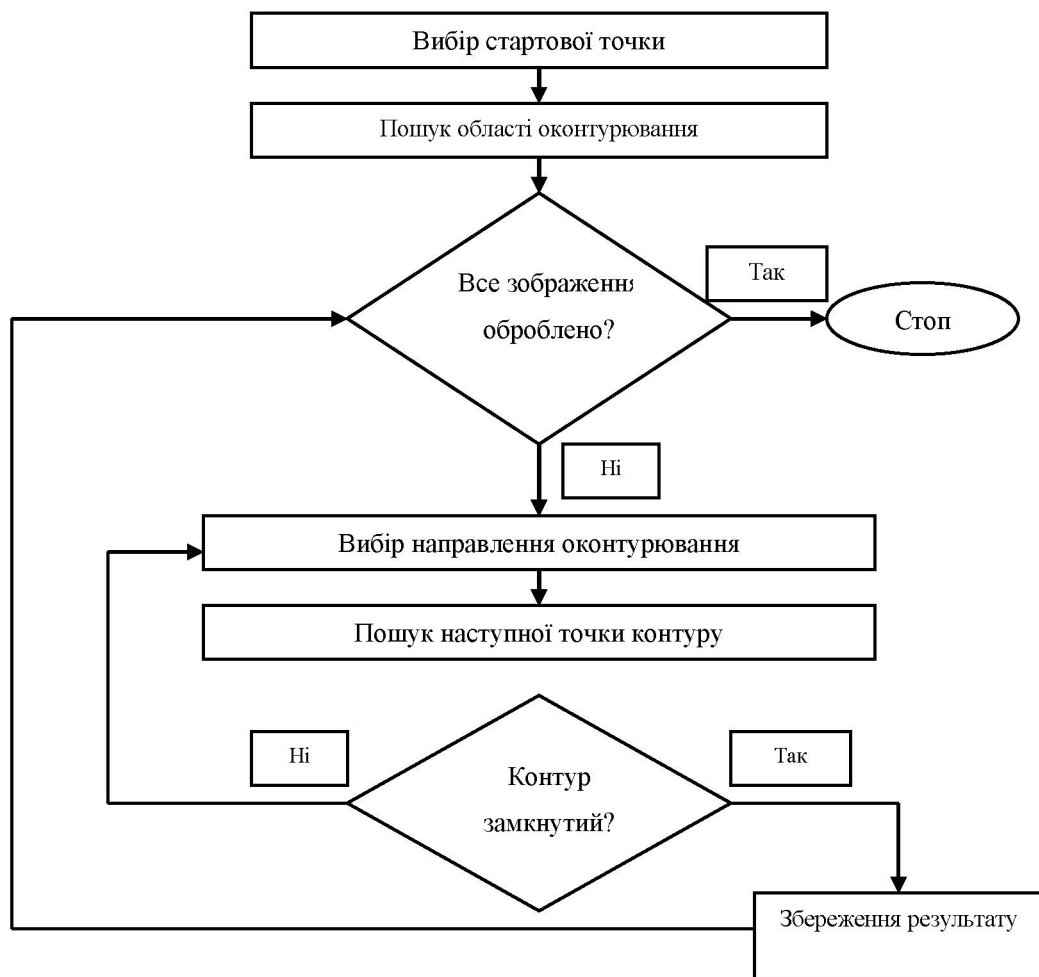


Рис. 3.8. Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки

Етапи автоматизованого оконтурювання плям:

- виокремлення аномальних ділянок морської поверхні за допомогою природних або штучних яскравісних ознак;
- побудова гістограми зображення та встановлення порогу видимості, що дозволяє ізолювати потрібні області;
- визначення початкової точки контуру методом попиксельного перегляду;
- повна векторизація ділянки з автоматичним визначенням напрямку обводу.

Результати зберігаються у вигляді окремих файлів, придатних до масштабування, трансформації координат та інтеграції в геоінформаційні системи (наприклад, ArcView). Векторизація дозволяє не лише просторово закріпити межі плям, а й оцінювати їхні параметри за допомогою статистичних і текстурних характеристик. Крім того, векторизований контур можна розглядати як функціональну залежність довжини вектора від приросту кута, що дає змогу формалізувати текстурну ознаку форми контуру. Це відкриває можливості для статистичної обробки даних, зокрема шляхом застосування математичних методів аналізу геометричних ознак забруднених об'єктів.

### **3.4. Інструменти для побудови картографічних моделей плямистості акваторій Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС**

Після руйнування Каховської ГЕС побудова картографічних моделей плямистості акваторій Чорного моря є важливим елементом для моніторингу екологічних змін. Інструменти для створення таких моделей включають супутникові технології, геоінформаційні системи (ГІС), спектральний аналіз і новітні алгоритми для автоматизованого оброблення даних. Основним інструментом є дистанційне зондування, зокрема супутникові сенсори, що працюють у різних спектральних діапазонах. Для визначення плямистості води використовуються мультиспектральні, гіперспектральні та радарні знімки.

Супутники Sentinel-2, Maxar, Landsat та інші платформи забезпечують отримання даних, які дозволяють оцінювати рівень забруднення, виявляти нафтові плями, аналізувати евтрофікацію, а також вивчати зміни в ландшафтній структурі та береговій лінії. Радарні дані з супутників Sentinel-1 дають змогу спостерігати за водними масами навіть в умовах низької видимості або при поганих погодних умовах.

Після руйнування Каховської ГЕС було реалізовано проєкт з екологічного моніторингу північно-західної частини Чорного моря. Використовувалися дані супутникових знімків, контактні вимірювання та математичне моделювання в середовищі Delft3D Mesh Suite для оцінки гідрофізичної обстановки та прогнозування поширення забруднень.

Моніторинг акваторії Чорного моря за допомогою інформаційних технологій є пріоритетним напрямом сучасних наукових досліджень у сфері екологічної безпеки, управління природними ресурсами та забезпечення сталого розвитку прибережних регіонів. Значення цього напрямку особливо зростає в умовах глобальних змін клімату, активного судноплавства, індустріального навантаження та військових загроз, які суттєво впливають на гідроекологічний стан Чорного, дають змогу здійснювати оперативний, системний та високоточний моніторинг стану морського середовища. Основу цієї системи становлять супутникові технології дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які дозволяють отримувати регулярні знімки великої просторової охопленості з різною роздільною здатністю, спектральною чутливістю та частотою оновлення. Наприклад, платформи Sentinel-1 (SAR) і Sentinel-2 (мультиспектральна зйомка) [611 програми Copernicus широко застосовуються для спостереження за температурним полем вод, кольором води, наявністю забруднень, а також для картографування берегової лінії та просторових змін у морських екосистемах(рис.3.9.).



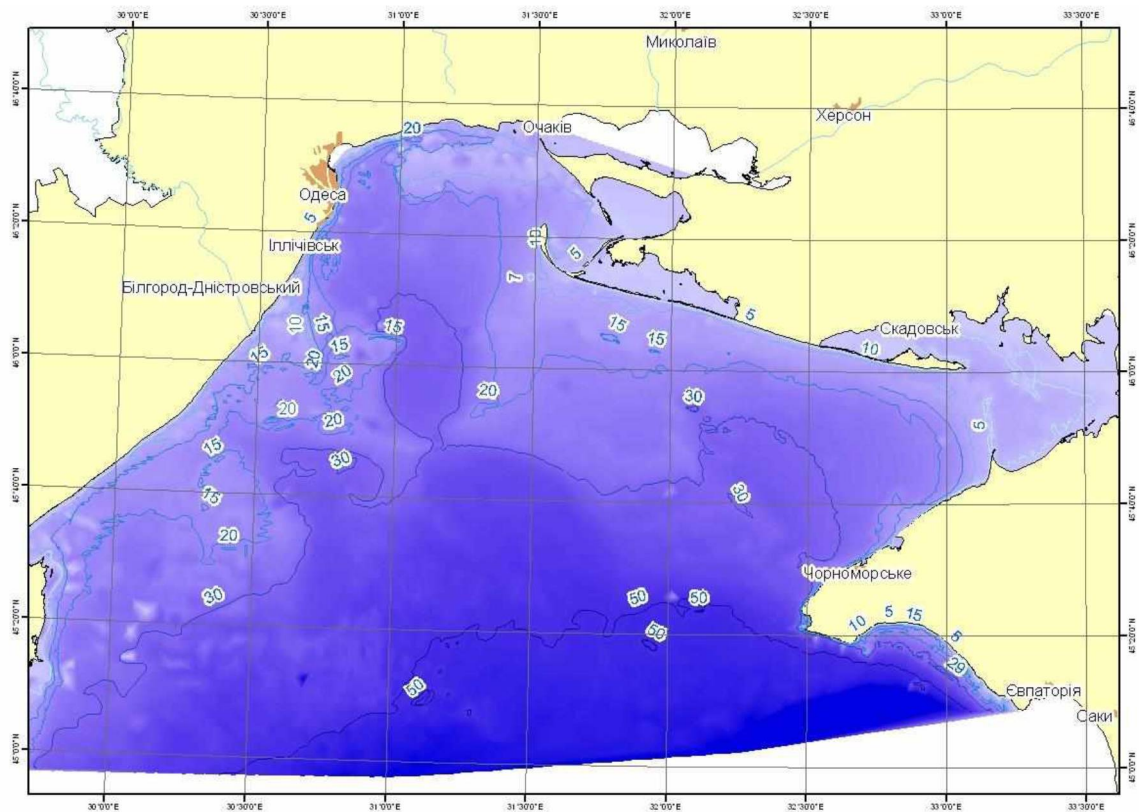


Рис.3.9. Картографування берегової лінії та просторових змін у морських екосистемах

Особливе місце у цифровому моніторингу Чорного моря займає використання спектральних індексів та класифікаційних алгоритмів. Зокрема, індекси якості води (наприклад, NDWI — Normalized Difference Water Index) використовуються для визначення меж акваторії, виявлення змін прозорості, концентрації фітопланктону або суспендованих частинок. Впровадження алгоритмів машинного навчання (random forest, SVM, нейронні мережі) в поєднанні з супутниковими даними дозволяє автоматично розпізнавати зони забруднення, ідентифікувати нафтові плями, викиди промислових об'єктів, а також виявляти динаміку зміщення берегової лінії.

Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) та хмарні платформи обробки даних — як-от Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub або NASA Worldview — надають дослідникам можливість виконувати великомасштабну просторово-часову

аналітику. Завдяки цим платформам можна не лише здійснювати ретроспективний аналіз (на основі архівних знімків), а й забезпечити оперативний доступ до щойно отриманих супутникових даних, що є особливо важливим під час аварій, розливів нафти або екологічних катастроф.

Моніторинг акваторії Чорного моря також охоплює дослідження гідродинамічних процесів, температурних аномалій, хлорофілу-А, солоності та течій. Наприклад, дані з сенсорів MODIS (на супутниках Aqua і Terra) та VIIRS (на супутниках Suomi NPP та NOAA-20) дозволяють аналізувати великомасштабні процеси, пов'язані з евтрофікацією, апвелінгами та цвітінням води.

У контексті військової загрози та забруднення, викликаного ворожими діями (включаючи вибухи, руйнування портів або затоплення суден), супутникові технології дозволяють виявляти зміни структури водної поверхні, оцінювати поширення забруднень і прогнозувати можливі наслідки для прибережних екосистем. У цьому напрямі важливим є співставлення оптичних знімків із радарними даними (Sentinel-1, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X), які є ефективними для виявлення нафтових плям, незалежно від погодних умов і часу доби.

Інтеграція даних ДЗЗ з даними in-situ (буї, гідрологічні станції, автономні датчики) дозволяє створити гібридні моделі оцінки екологічного стану Чорного моря. Такі моделі враховують не лише космічну інформацію, а й фізико-хімічні параметри (температура, рН, солоність), що забезпечує вищу точність прогнозів та рішень для екологічного управління.

До війни одним із серйозних джерел забруднення морських акваторій залишались зворотні води зрошувальних систем, зокрема в Херсонській області. Особливо значним був вплив на Каржінську, Джагарлицьку, Каланчакську та Перекопську затоки, куди скидалися агрохімікатами насичені зворотні води з рисових чеків. У роки до повномасштабної війни активно впроваджувались екологічно безпечні технології рисівництва, які сприяли зниженню пестицидного навантаження. Проте у 2022–2023 роках зрошувальна інфраструктура зазнала

нищівних пошкоджень внаслідок воєнних дій. Найбільш масштабним екологічним лихом став підриг Каховської ГЕС у червні 2023 року. Це призвело до масштабного затоплення дельти Дніпра та знищення каналів зрошення і осушення, внаслідок чого сотні тисяч гектарів сільськогосподарських угідь перетворилися на заболочені території. Зворотні води з підтоплених рисових полів і фрагментованої агроінфраструктури масово потрапляють у морські затоки, переносячи забруднюючі речовини, у тому числі нітрати, фосфати, гербіциди та пестициди. Згідно з оновленою інвентаризацією, до переліку екологічно небезпечних об'єктів слід додати нові "гарячі точки", які виникли внаслідок бойових дій. Це, зокрема, зруйновані склади нафтопродуктів, підірвані ділянки водопровідно-каналізаційних мереж, затоплені ділянки інфраструктури, де розміщувалися хімічні добрива. За даними екоінспекції, у 2023 році у прибережні води півдня України потрапило понад 300 тис. тонн промислових відходів з пошкоджених підприємств та сільськогосподарських складів. Унаслідок атак на морські порти й кораблі фіксуються численні випадки розливу пального в акваторії, що утворює нафтові плями, які впливають на фітопланктон, мігруючі види риб і водоплавних птахів. Крім того, мікроскопічні частинки металу та вибухових речовин, що залишаються після бойових дій, здатні змінювати хімічний склад води, підвищуючи її токсичність(табл.3.4.).

Таблиця 3.4. Параметри вимірювання в пунктах спостереження якості морських вод»

| Категорія пункту       | Глибини відбору проб         | Забруднюючі речовини        | Призначення                               |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|
| 1-ша (прибережна зона) | поверхня, 5, 10, 20 м, дно   | Нафта, ПАВ, важкі метали    | Контроль у зонах скиду, портів, рекреації |
| 2-га (перехідна зона)  | поверхня, 10 м, дно          | Ті самі + мігруючі речовини | Моніторинг переносу забруднень            |
| 3-тя (відкрите море)   | поверхня, 10, 50, 100 м, дно | Важкі метали, вуглеводні    | Формування балансу речовин                |

Інтеграція цих даних у геоінформаційні системи (ГІС) дає змогу проводити просторовий аналіз, створювати моделі змін і прогнозувати подальший розвиток

екологічних процесів на акваторії Чорного моря. Для уточнення карт плямистості застосовуються спектральні індекси, такі як NDWI (Normalized Difference Water Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) та FUI (Floating Unnatural Index), які допомагають відрізнити різні типи забруднень, а також оцінювати ступінь чистоти води. Алгоритми машинного навчання і глибинного навчання автоматизують процес класифікації об'єктів і виявлення змін на супутникових знімках, що суттєво підвищує точність і ефективність моніторингу. Інтеграція таких даних у спеціалізовані платформи, наприклад Google Earth Engine чи Copernicus Hub, дозволяє створювати комплексні карти, прогнозувати екологічні наслідки руйнування ГЕС та ефективно реагувати на зміни, що виникають внаслідок цього інциденту.

### **Висновки до розділу 3.**

1. Розроблені методи інтеграції сучасних інформаційних технологій, таких як супутникове дистанційне зондування, геоінформаційні системи (ГІС) та машинне навчання (ML), є ефективним інструментом для моніторингу екологічного стану Чорного моря, забезпечуючи точну та оперативну оцінку стану морських акваторій в умовах антропогенного навантаження та природних змін.

2. Запропоновані математичні моделі дешифрування супутникових знімків з використанням алгоритмів машинного навчання (зокрема згорткових нейронних мереж та YOLOv5) дозволяють автоматично виявляти забруднення, класифікувати об'єкти забруднення і прогнозувати їх розвиток, що суттєво підвищує ефективність прийняття управлінських рішень.

3. Розроблені інтерфейси для інтерактивного екологічного моніторингу, що поєднують супутникові дані, інформацію з польових вимірювань і IoT сенсорів, дозволяють здійснювати комплексний аналіз і візуалізацію екологічної ситуації. Вони є важливими інструментами для сталого розвитку прибережних регіонів, забезпечення екологічної безпеки та оперативного реагування на екологічні загрози.

#### **РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕГРОВАНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МОРСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА**

У четвертому розділі дисертаційної роботи представлено методологічні підходи до вдосконалення технологій інтегрованого аерокосмічного моніторингу морських акваторій із застосуванням сучасних інформаційних та обчислювальних технологій. Розглянуто шляхи підвищення ефективності обробки великих обсягів супутникових даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) з метою оперативного виявлення екологічних змін у Чорному та Азовському морях. Особливу увагу приділено оптимізації обчислювальних процесів при обробці супутникових зображень з платформ Sentinel-2, Landsat-8, MODIS, WorldView, з урахуванням специфіки виявлення забруднень, змін берегової лінії, фіксації нафтових плям, температурних аномалій та інших екологічно значущих показників. Проведено порівняння ефективності реалізації обробки з використанням різних типів середовищ: традиційних CPU-серверів, високопродуктивних GPU-кластерів, хмарних платформ (Google Earth Engine, AWS, Azure) та інструментів контейнеризації (Docker, Kubernetes).

Запропоновано архітектурно-функціональну модель інтегрованої ІТ-системи, яка поєднує засоби паралельної обробки, глибоке навчання для автоматизованого дешифрування, геоінформаційний аналіз та механізми швидкого розгортання сервісів у хмарному середовищі. Такий підхід дозволяє зменшити час обробки типових запитів щодо моніторингу стану акваторій до 30–40% у порівнянні з традиційними системами, а також забезпечує гнучке масштабування ресурсів залежно від складності задачі та обсягів вхідних даних.

У розділі також детально описано реалізацію механізмів попередньої обробки знімків (маскування хмарності, нормалізація спектральних каналів, фільтрація шумів), модулі автоматизованої класифікації забруднень і побудови багат шарових екологічних картограм. Підкреслено роль високої обчислювальної готовності

системи для оперативного використання результатів у кризових ситуаціях, моніторингу бойових дій у прибережних районах та оцінки ризиків для природоохоронних територій.

#### **4.1. Розроблення програмного комплексу для тематичного аналізу супутникових знімків морських акваторій,**

##### **4.1.1. Розроблення векторизованих топографічних карт прибережних областей та карти глибинних ізобат морської акваторії.**

Аналіз спектра основних тематичних задач супутникового моніторингу Чорного моря свідчить про те, що для їх ефективного виконання доцільно використовувати дані зйомки з таких супутникових платформ, як: NOAA, LANDSAT, SPOT, IKONOS, QUICKBIRD, EROS, ASTER, IRS, RADARSAT, Метеор-3М, РЕСУРС-О. Технічні параметри цих супутників, а також джерела, з яких можна отримати відповідні зображення, наведені в наступному розділі.

Сучасна парадигма впровадження супутникових технологій для моніторингу морських акваторій, що перебувають під впливом прибережної інфраструктури, річкового стоку, господарської діяльності в межах територіальних вод і виключної економічної зони, а також морського транспорту, передбачає використання не лише даних супутникової зйомки, але й геоінформаційних технологій (ГІС) [62]. Ці інструменти забезпечують просторову прив'язку як вихідних космічних зображень, так і картографічних моделей, отриманих шляхом тематичного дешифрування.

У цьому контексті важливе значення мають ГІС-платформи. З урахуванням функціональних можливостей, вартості, масштабованості та сумісності, найдоцільнішим є використання ArcGIS як базової системи для супутникового моніторингу акваторії Чорного моря. В основі ГІС-моделі — векторизовані топографічні карти прибережних областей та карти глибинних ізобат морської акваторії. Зокрема, для побудови топографічної основи використовувалися карти

територій Одеської, Миколаївської, Херсонської областей та АР Крим масштабу 1:200 000, розроблені за замовленням МНС України. Векторна батиметрична карта створена згідно з алгоритмічною методикою, представленою в четвертому розділі.

Процес тематичної обробки космічних зображень морських акваторій зазвичай передбачає сегментацію зображення — виділення однорідних ділянок за спектральними, термічними або електромагнітними характеристиками. Для вирішення цього завдання доцільно застосовувати програмні інструменти середовища ERDAS IMAGINE.

#### **4.1.2. Екологічна інтерпретація картографічних моделей, сформованих у результаті дешифрування супутникових знімків**

В дисертаційній роботі розроблено власний програмний комплекс для тематичного аналізу супутникових знімків морських акваторій, який базується на концепції виявлення плямистих структур, обумовлених варіативністю гідрооптичних, гідроелектричних та гідробіологічних параметрів. Теоретичні положення та архітектура цього програмного комплексу розкриті в п'ятому розділі монографії.

Під час виявлення структур плямистості враховувалися спектральні характеристики сенсорів та їх інформативність у заданому діапазоні. Для уточнення результатів аналізу зображень застосовувалися алгоритми сегментації, що враховують гістограми яскравості, частотну фільтрацію, текстурні особливості, а також метрики просторової кластеризації. На базі отриманих результатів була сформована база знань, орієнтована на предметно-галузеву інтерпретацію, яка дозволяє проводити векторизацію кластерів і зберігати їх як тематичні шари у форматах, що підтримуються ГІС.

До процесу екологічної інтерпретації картографічних моделей, сформованих у результаті дешифрування супутникових знімків, залучається ретроспективна інформація, зокрема:

- результати Державного моніторингу поверхневих вод;
- звітні дані водокористувачів;
- топографічні характеристики джерел забруднення.

Ілюстративними прикладами структурованої атрибутивної інформації є наведені нижче Таблиця 4.1.(об'єми скидів у Миколаївській області за 2015–2022 роки) та Таблиця 4.2 (середньорічні концентрації речовин у водних створах регіону у 2020 році рис 4.1).

Таблиця 2.1 – Об'єми скидів стічних вод (Миколаївська область)

| Назва водокористувача   | 2015 р. — Об'єм, млн. м <sup>3</sup> | 2015 р. — Забруднення, т | 2020 р. — Об'єм, млн. м <sup>3</sup> | 2020 р. — Забруднення, т | 2022 р. — Об'єм, млн. м <sup>3</sup> | 2022 р. — Забруднення, т |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| МКП «Миколаївводоканал» | 35.73                                | 39140.143                | 30.15                                | 30907.043                | 29.108                               | 29888.54                 |
| ДАХК «ЧСЗ»              | 0.184                                | 35.93                    | 0.134                                | 22.1                     | 0.0798                               | 35.9                     |
| ТОВ СП «Нібулон»        | 0.003                                | 1.7                      | 0.003                                | 1.4                      | 0.003                                | 1.301                    |
| БГКП «Сирена»           | 0.251                                | 162.2                    | 0.255                                | 120.64                   | 0.206                                | 60.43                    |



Рис.4.1. Техногенне навантаження регіону досліджень



Картографічна модель в ГІС із джерелами забруднення Чорного моря створюється для візуалізації антропогенних впливів у прибережних регіонах, зокрема на прикладі Миколаївської області. Основною метою побудови такої моделі є інтеграція супутникових даних із наземною статистикою про обсяги скидів, джерела забруднення та якісні характеристики вод, що дозволяє проводити просторово-часовий аналіз стану морського середовища. Для побудови ГІС-моделі використовуються вихідні дані, серед яких координати та атрибутивна інформація про підприємства-водокористувачі (МКП «Миколаївводоканал», ДАХК «ЧСЗ», ТОВ СП «Нібулон», БГКП «Сирена»), статистика скидів за 2015–2022 рр. (табл. 2.1), а також гідрохімічні показники за 2023 рік у контрольних створах Бузького та Дніпро-Бузького лиманів рис 4.2 (табл. 4.2).

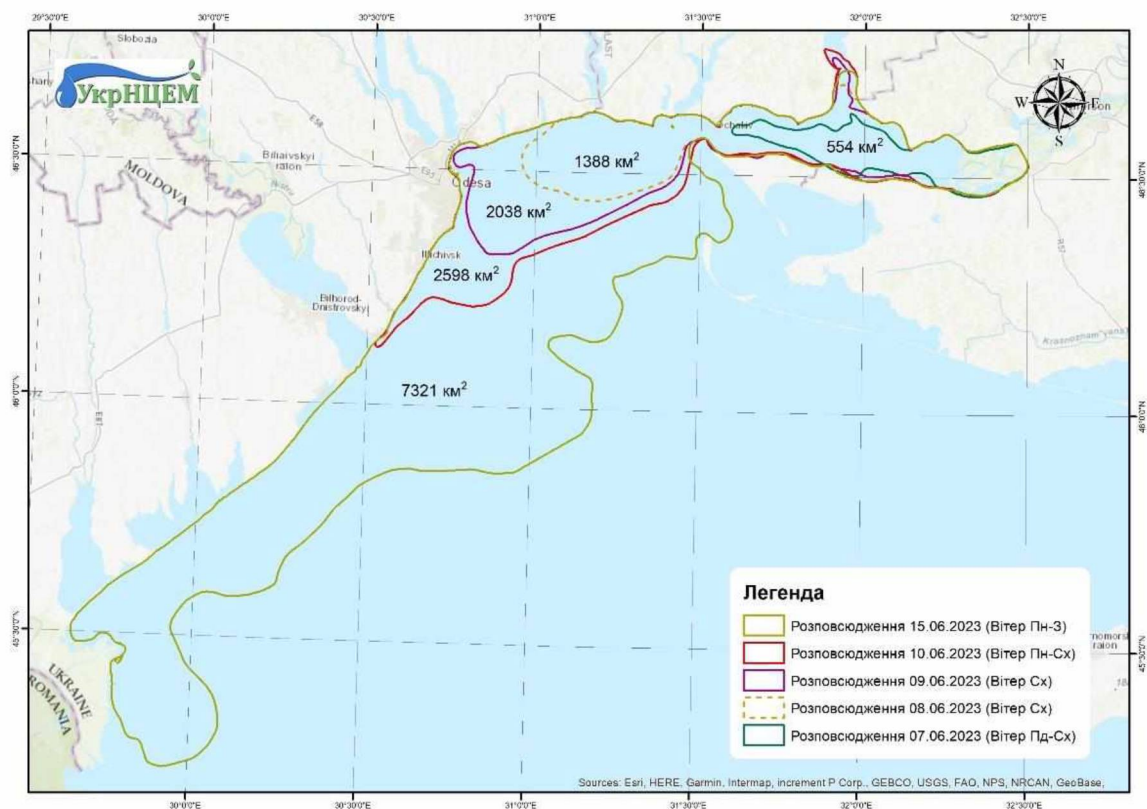


Рис.4.2. Карта контрольних створів Бузького та Дніпро-Бузького лиманів

Як картографічну основу використовують топографічні карти масштабу 1:200

000, що охоплюють території Одеської, Миколаївської, Херсонської областей і Криму, а також векторну батиметричну карту Чорного моря. Супутникові знімки Sentinel-2 і MODIS інтегруються в ГІС як растрові шари, що відображають концентрацію хлорофілу, температурні аномалії та індекси водних характеристик.

У середовищі ArcGIS або QGIS створюються тематичні шари: адміністративні межі, гідрографія, батиметрія, точкові об'єкти водокористувачів із відповідною атрибутивною інформацією, контрольні створи як пункти спостереження. Виконується зонування джерел забруднення за обсягом скидів із застосуванням кольорової градації, а також будуються буферні зони для відображення зон потенційного впливу на морське середовище. Супутникові дані дозволяють накладати спектральну інформацію на карту забруднювачів, що підвищує точність виявлення екологічно небезпечних ділянок. У результаті аналізу встановлено, що найбільш інтенсивні скиди у Бузький лиман супроводжуються зростанням концентрацій завислих речовин, хлоридів, сульфатів і важких металів. У прибережній зоні м. Очаків простежується накопичення мінеральних солей і органічних сполук, що узгоджується з наявністю портових об'єктів і техногенного навантаження.

Побудована картографічна модель дозволяє не лише відображати поточний стан забруднення, а й прогнозувати ризики деградації акваторій. Інформація, отримана з моделі, є критично важливою для органів державного екологічного моніторингу, водогосподарських організацій, морської інфраструктури, а також для проведення екологічної експертизи. Просторовий аналіз зон впливу водокористувачів забезпечує підґрунтя для прийняття управлінських рішень щодо зменшення навантаження на морське середовище, оптимізації режимів скидання, підготовки програм рекультивації та ревіталізації, а також підвищення ефективності ліквідаційних заходів у випадку надзвичайних ситуацій[63]. Візуалізація отриманих результатів у форматі картографічної моделі дозволяє здійснювати інтерактивний моніторинг, накладення шарів у режимі реального часу

та оновлення баз даних у межах єдиного ГІС-середовища. Така модель є базовим інструментом у системі супутниково-геоінформаційного моніторингу акваторії Чорного моря, яка дозволяє поєднувати дистанційне зондування Землі з польовими вимірюваннями, гідрохімічним аналізом і статистичними даними, формуючи уніфіковану картину антропогенного навантаження на морське середовище.

Таблиця 4.2 – Середньорічні концентрації речовин (Миколаївська область)

| Місце спостереження                                                | БС К5 | Завислі речовини | Амоній | Нітри | Нітрати | Хлориди | Сульфати | Нафтопродукти | Залізо загальне | Мідь | Фосфати |
|--------------------------------------------------------------------|-------|------------------|--------|-------|---------|---------|----------|---------------|-----------------|------|---------|
| Бузький лиман, м. Миколаїв (нижче скиду ВАТ «Дамен Шіпярдс Океан») | 1.3   | 0.4              | 0.4    | 0.0   | 5.8     | 4.7     | 2.3      | 3.3           | 0.2             | 1.9  | 2.4     |
|                                                                    | 1.5   | 0.3              | 0.4    | 0.0   | 5.7     | 4.4     | 1.7      | 1.1           | 0.1             | 2.5  | 2.2     |
| Дніпро-Бузький                                                     | 1.6   | 1.0              | 0.1    | 0.0   | 3.6     | 2.7     | 1.5      | 2.3           | 0.2             | 14.0 | 0.4     |

|                                                                     |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| лиман,<br>м.<br>Очаків<br>(аквато<br>рія<br>морсько<br>го<br>порту) |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|---------------------------------------------------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Картографічна модель у ГІС, що відображає джерела забруднення в акваторії Чорного моря, є інтегрованим інструментом для аналізу та візуалізації екологічного стану регіону. Ця модель поєднує дані дистанційного зондування Землі, результати державного моніторингу водних ресурсів та інформацію про антропогенні впливи, що дозволяє створити детальну картину розподілу забруднень.

Оснoву моделі становить базова топографічна карта, яка включає в себе векторні шари берегової лінії, глибини морського дна та гідрографічну мережу. Ці дані забезпечують географічну прив'язку для подальшого аналізу. На цю основу накладаються шари, що відображають джерела забруднення, такі як промислові підприємства, порти, стічні води та інші об'єкти, які можуть впливати на екологічний стан моря.

Дані дистанційного зондування, отримані з супутників Sentinel-2, Sentinel-3 та MODIS, використовуються для виявлення аномалій у водному середовищі, таких як підвищені концентрації хлорофілу, температурні відхилення та наявність нафтових плям. Ці дані обробляються за допомогою програмного забезпечення, такого як ERDAS IMAGINE, що дозволяє ідентифікувати та класифікувати зони забруднення.

Інформація про обсяги скидів стічних вод та концентрації забруднюючих речовин, зібрана з офіційних джерел, інтегрується в модель у вигляді атрибутивних

таблиць. Це дозволяє проводити аналіз змін у часі та виявляти тенденції погіршення або покращення екологічного стану.

Для візуалізації та аналізу даних використовується платформа ArcGIS, яка забезпечує інтерактивний доступ до інформації та можливість створення тематичних карт. Це дозволяє користувачам, таким як екологи, планувальники та представники влади, отримувати актуальну інформацію для прийняття рішень щодо охорони та відновлення морського середовища.

Таким чином, створена картографічна модель у ГІС є потужним інструментом для моніторингу та управління екологічним станом Чорного моря, забезпечуючи комплексний підхід до виявлення, аналізу та візуалізації джерел забруднення.

Картографічна модель джерел забруднення в ГІС для акваторії Чорного моря є інтегрованим інструментом, що поєднує супутникові дані, результати державного моніторингу та геоінформаційні технології для виявлення, аналізу та візуалізації джерел антропогенного впливу на морське середовище рис 4.3.

3D-профіль концентрацій забруднення в прибережній зоні Чорного моря

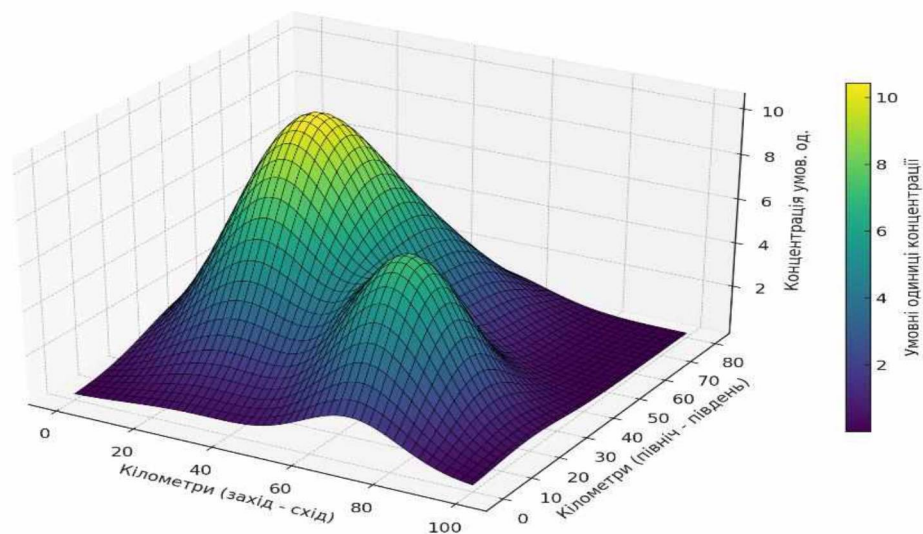


Рис. 4.3 Д-профільконцентрації забруднення в прибережній зоні Чорного моря.

Основою цієї моделі є багат шаровий підхід, де кожен шар представляє

окремий аспект екологічного стану:

- гідрографічні шари включають в себе топографічні карти узбережжя, батиметричні дані та гідрологічні особливості, що дозволяє точно відображати фізичні характеристики морського дна та берегової лінії;
- антропогенні джерела забруднення відображають розташування промислових підприємств, портів, очисних споруд та інших об'єктів, що потенційно можуть бути джерелами забруднення;
- супутникові дані використовуються для моніторингу параметрів водного середовища, таких як температура, концентрація хлорофілу, наявність нафтових плівок та інших показників, що свідчать про екологічний стан акваторії;
- дані державного моніторингу включають інформацію про обсяги скидів стічних вод, концентрації забруднюючих речовин та інші показники, що надаються відповідними органами контролю.

Інтеграція цих шарів у єдину ГІС-модель дозволяє здійснювати комплексний аналіз екологічного стану Чорного моря, виявляти зони з підвищеним рівнем забруднення, оцінювати вплив антропогенних факторів та планувати заходи з охорони та відновлення морського середовища.

Завдяки використанню сучасних геоінформаційних технологій, така модель є ефективним інструментом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та сталого використання ресурсів Чорного моря.

#### **4.1.3. Розроблення програмного комплексу для каталогізації, зберігання та пошуку космічних знімків Азовського моря**

Є стратегічно важливим етапом у впровадженні інформаційних технологій дистанційного зондування Землі в екологічний моніторинг. Цей підхід дозволяє забезпечити систематизований доступ до знімків високої та середньої роздільної здатності, зібраних із різних космічних апаратів — NOAA, TERRA, SPOT, LANDSAT, QuickBird, — що охоплюють значні часові проміжки та спектральні

діапазони[65]. Такий комплекс слугує основою для аналізу поверхневих вод, моделювання екологічних змін, дешифрування динаміки забруднення, а також розробки сценаріїв сталого природокористування в регіоні Азовського моря.

Принциповим ядром комплексу є автоматизована система адміністрування архіву даних ДЗЗ. Вона забезпечує створення та ведення нормативно-довідкової інформації, супроводжує структуру оперативного і довготермінового архівів, підтримує оновлення електронного каталогу та формує звітну документацію. Важливим є впровадження надійного механізму копіювання та відновлення бази даних, що гарантує збереження унікального інформаційного фонду.

Другим функціональним модулем є робота з оперативним архівом: включення нових знімків, формування попередніх візуалізацій (Quick Look), введення метаданих, пошук за критеріями (дата, супутник, географічна прив'язка тощо), збереження в базі даних або видалення. Це дозволяє ефективно працювати з новими надходженнями знімків і оперативно приймати рішення щодо їхньої актуальності.

У довготерміновому архіві зберігаються упорядковані пакети даних, розподілені за типами носіїв (CD, DVD), форматами та джерелами зйомки. Формування знімків супроводжується створенням картограм — наочних графічних форм представлення територій, які покриті знімками, — що значно полегшує навігацію та пошук в архіві.

Інтерфейс оператора програмного комплексу містить широкі можливості взаємодії з файлами растрових зображень: відкриття, сканування, перегляд інформації про файл і диск, збереження, а також інтеграцію із зовнішніми програмами для обробки зображень (ArcGIS, ENVI, Photoshop тощо). Особливістю є гнучке управління редакцією знімків: зміна яскравості та контрастності, застосування фільтрів, копіювання фрагментів, поворот зображень та збереження результатів.

Важливою інноваційною частиною є модуль роботи з векторними картами, де

користувачі можуть переглядати геопросторові шари у форматах .shp, здійснювати прив'язку растрових зображень, працювати з легендою шарів, а також формувати і зберігати проекти відображення. Це дозволяє накладати векторні дані на космічні знімки, що є критично важливим для проведення дешифрування, тематичного аналізу та картографування екологічної ситуації.

Крім того, система дозволяє створювати і редагувати базу даних знімків, формувати звіти за обраними параметрами, вести інвентаризацію наявної інформації та супутніх метаданих. Це сприяє формуванню уніфікованого сховища інформації для подальшого використання у наукових дослідженнях, навчальних програмах або управлінських рішеннях.

Таким чином, принципи побудови програмного комплексу каталогізації космічних знімків ґрунтуються на багатофункціональній автоматизованій структурі, яка поєднує архівування, пошук, перегляд, аналіз і візуалізацію даних у єдиному середовищі. Це дає змогу максимально ефективно використовувати ресурси супутникового моніторингу при вивченні Азовського моря та його прибережної зони, особливо в умовах екологічного навантаження, активного господарського освоєння та загроз деградації природних водних систем.

## **4.2. Автоматизоване виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерокосмічними знімками**

### **4.2.1. Тестування архітектур штучного інтелекту для виділення прибережних об'єктів**

У процесі дослідження автоматизованого виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерокосмічними знімками одним із ключових завдань стало тестування архітектур штучного інтелекту, зокрема глибоких нейронних мереж, таких як CNN (Convolutional Neural Networks), U-Net, DeepLab та їх модифікацій. Ці архітектури є сучасними інструментами в галузі



комп'ютерного зору, здатними забезпечити високу точність семантичної сегментації зображень та класифікації об'єктів на знімках, що є особливо актуальним у задачах екологічного моніторингу прибережних зон.

Класична згорткова нейронна мережа (CNN) демонструє надійну продуктивність при попередньому виділенні загальних структур берегової лінії, проте її можливості обмежені при роботі з деталізованими елементами ландшафту, такими як дрібні водотоки, смуги водоростей, прибережна рослинність або інфраструктурні об'єкти[65]. Тому для підвищення просторової точності було протестовано мережу U-Net — спеціалізовану архітектуру, створену для біомедичної сегментації, яка відзначається здатністю працювати з малими наборами даних і забезпечує ефективне поєднання просторового контексту та локальних ознак через симетричну структуру енкодера-декодера.

Ще більш високі результати точності вдалося досягти при використанні архітектур DeepLabv3+ та її варіантів, які завдяки використанню атразійних згорток (atrous convolution) і механізмів багатомасштабної агрегації контексту (ASPP – Atrous Spatial Pyramid Pooling) дозволяють враховувати контексти різних розмірів, що особливо важливо для класифікації водних тіл, ділянок ерозії, плям забруднення, змішаної рослинності, урбанізованих фрагментів узбережжя.

Для навчання моделей використовувались супутникові знімки Sentinel-2, Landsat-8 та високодеталізовані аерофото знімки з БПЛА. В якості референсних даних застосовувалися вручну верифіковані карти об'єктів, що дозволило створити якісні маски для задач семантичної сегментації. Крім того, додаткове підвищення точності досягалося за рахунок застосування технік data augmentation (обертання, масштабування, спектральне зміщення) та оптимізації функції втрат, зокрема через використання комбінації Dice Loss та Binary Crossentropy.

На етапі оцінювання ефективності було зафіксовано, що U-Net та DeepLabv3+ стабільно забезпечують IoU (індекс перетину з об'єднанням) на рівні 0.82–0.88 при виявленні пляжних зон, заболочених ділянок і водної поверхні, що вказує на їх

придатність до використання в екологічному моніторингу в умовах недостатньої якості вихідного знімального матеріалу або значної варіабельності ландшафтів. Окремо варто зазначити гнучкість цих моделей до адаптації під інші задачі — наприклад, виявлення сміттєвих накопичень на береговій лінії, оцінку зміни берегової смуги чи інтеграцію в ГІС-системи для оперативного управління прибережними територіями.

Таким чином, результати тестування архітектур CNN, U-Net та DeepLab підтвердили їхню доцільність для задач екологічного картографування та автоматизованого моніторингу прибережних зон, з перспективами подальшого розширення на інші водні об'єкти — річки, лимани, дельти, порти.

#### **4.2.2. Затосування методів оцінки точності результатів розпізнавання зображень морських акваторій та прибережних зон**

У процесі дослідження автоматизованого виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерокосмічними знімками одним із ключових завдань стало тестування архітектур штучного інтелекту, зокрема глибоких нейронних мереж, таких як CNN (Convolutional Neural Networks), U-Net, DeepLab та їх модифікацій. Ці архітектури є сучасними інструментами в галузі комп'ютерного зору, здатними забезпечити високу точність семантичної сегментації зображень та класифікації об'єктів на знімках, що є особливо актуальним у задачах екологічного моніторингу прибережних зон.

Класична згортова нейронна мережа (CNN) демонструє надійну продуктивність при попередньому виділенні загальних структур берегової лінії, проте її можливості обмежені при роботі з деталізованими елементами ландшафту, такими як дрібні водотоки, смуги водоростей, прибережна рослинність або інфраструктурні об'єкти. Тому для підвищення просторової точності було протестовано мережу U-Net — спеціалізовану архітектуру, створену для

біомедичної сегментації, яка відзначається здатністю працювати з малими наборами даних і забезпечує ефективне поєднання просторового контексту та локальних ознак через симетричну структуру енкодера-декодера.

Ще більш високі результати точності вдалося досягти при використанні архітектур DeepLabv3+ та її варіантів, які завдяки використанню атразійних згорток (atrous convolution) і механізмів багатомасштабної агрегації контексту (ASPP – Atrous Spatial Pyramid Pooling) дозволяють враховувати контексти різних розмірів, що особливо важливо для класифікації водних тіл, ділянок ерозії, плям забруднення, змішаної рослинності, урбанізованих фрагментів узбережжя.

Для навчання моделей використовувались супутникові знімки Sentinel-2, Landsat-8 та високодеталізовані аерофото знімки з БПЛА. В якості референсних даних застосовувалися вручну верифіковані карти об'єктів, що дозволило створити якісні маски для задач семантичної сегментації. Крім того, додаткове підвищення точності досягалося за рахунок застосування технік data augmentation (обертання, масштабування, спектральне зміщення) та оптимізації функції втрат, зокрема через використання комбінації Dice Loss та Binary Crossentropy.

На етапі оцінювання ефективності було зафіксовано, що U-Net та DeepLabv3+ стабільно забезпечують IoU (індекс перетину з об'єднанням) на рівні 0.82–0.88 при виявленні пляжних зон, заболочених ділянок і водної поверхні, що вказує на їх придатність до використання в екологічному моніторингу в умовах недостатньої якості вихідного знімального матеріалу або значної варіабельності ландшафтів. Окремо варто зазначити гнучкість цих моделей до адаптації під інші задачі — наприклад, виявлення сміттєвих накопичень на береговій лінії, оцінку зміни берегової смуги чи інтеграцію в ГІС-системи для оперативного управління прибережними територіями.

Таким чином, результати тестування архітектур CNN, U-Net та DeepLab підтвердили їхню доцільність для задач екологічного картографування та автоматизованого моніторингу прибережних зон, з перспективами подальшого

розширення на інші водні об'єкти — річки, лимани, дельти, порти.

### **4.3. Розробка інструментів розпізнання об'єктів та оптимізація обчислювальних ресурсів у задачах супутникового моніторингу морських акваторій та прибережних зон**

#### **4.3.1. Використання графічних процесорів**

Застосування GPU є стандартом у завданнях обробки супутникових зображень, особливо коли йдеться про глибоке навчання (наприклад, при використанні CNN, UNet, DeepLab тощо для семантичної сегментації берегової лінії) [67]. Паралельна архітектура GPU дозволяє одночасно обробляти мільйони пікселів, значно пришвидшуючи як фазу тренування моделей, так і їх інференцію (прогнозування). Для супутникових задач з великим охопленням територій, де необхідно виконувати піксель-бай-піксель аналіз (наприклад, визначення площ забруднення), GPU забезпечує у десятки разів вищу продуктивність порівняно з традиційними CPU. Використання графічних процесорів (GPU) у дослідженні Чорного моря суттєво підвищує ефективність обробки великомасштабних супутникових та гідроекологічних даних, що надходять з орбітальних апаратів, безпілотних систем та підводних сенсорів. З огляду на зростаючий обсяг інформації з таких джерел, як супутники Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat-8/9, MODIS та інші, застосування GPU стало необхідною умовою для забезпечення оперативності й точності моніторингу стану морських акваторій[68].

Зокрема, GPU використовується для високошвидкісної обробки супутникових знімків у рамках класифікації водних поверхонь, визначення температурних аномалій, картографування цвітіння води та аналізу змін берегової лінії. Потужність графічних процесорів дозволяє в реальному часі реалізовувати складні моделі глибокого навчання, такі як UNet, DeepLab чи ResNet, які забезпечують високоточне сегментування і розпізнавання прибережних і морських об'єктів.

У межах аналізу екологічного стану моря GPU використовується для навчання та застосування штучних нейронних мереж, що виявляють нафтові плями, судна та їхні траєкторії, моделюють поширення забруднень. Завдяки паралельній обробці мільйонів зображень, графічні процесори дозволяють здійснювати обчислення, які без них були б надто тривалими або взагалі неможливими в реальних часових масштабах. При цьому ключову роль відіграють фреймворки з підтримкою CUDA, як-от TensorFlow, Keras, PyTorch, що оптимізують розрахунки на GPU.

Графічні процесори також забезпечують значне прискорення обчислення екологічних індексів, таких як NDWI, FAI чи NDCI, які є важливими показниками у виявленні забруднень, цвітіння водоростей, зниження прозорості або порушення гідробіологічного балансу. Застосування GPU для геопросторового аналізу дозволяє будувати високоточно прив'язані карти індексів у форматі тайлів або мозаїк, які можуть виводитися на візуалізаційні панелі, інтегровані в системи ГІС-моніторингу. Крім того, GPU дозволяє реалізовувати складні гідродинамічні моделі поширення забруднень у Чорному морі, моделі осадконакопичення, перенесення тепла та речовин у водних масах. Програмні комплекси на зразок ROMS або Delft3D можуть бути оптимізовані під GPU, що дає змогу значно зменшити час обчислень при моделюванні ситуацій на великих просторових і часових масштабах. Це особливо важливо для створення моделей раннього попередження про розливи нафти, аварійні скиди або неконтрольоване цвітіння водоростей.

Сучасна практика також передбачає активне використання хмарних обчислювальних платформ з підтримкою GPU, таких як Google Earth Engine, Amazon Web Services, Microsoft Azure чи NVIDIA GPU Cloud[69]. Вони дозволяють масштабувати дослідження на регіональному рівні без необхідності утримувати локальні обчислювальні кластери, забезпечуючи доступ до потужних інструментів аналізу для наукових установ, екологічних служб і незалежних дослідників.

#### 4.3.2. Паралелізація на рівні CPU-кластерів

Паралелізація на рівні CPU-кластерів відіграє ключову роль у реалізації масштабованих інформаційних технологій для дослідження акваторій Чорного моря, забезпечуючи ефективну обробку великих обсягів екологічних, супутникових та гідрофізичних даних. У зв'язку з тим, що морське середовище характеризується складною динамікою, значною просторово-часовою мінливістю та залежністю від численних факторів, використання кластерних обчислень на базі центральних процесорів (CPU) дозволяє реалізовувати детальні математичні та екологічні моделі у високій роздільності та з широким охопленням.

У контексті супутникового моніторингу Чорного моря паралелізація обчислень дає змогу значно прискорити обробку великомасштабних архівів супутникових зображень (Sentinel-2, Landsat, MODIS, VIIRS та інші). CPU-кластери дозволяють здійснювати масову обробку даних у вигляді тайлів, використовуючи паралельні потоки для автоматизованого дешифрування берегової лінії, класифікації типів поверхні, картографування температури поверхні моря, виявлення нафтових плям, зон цвітіння водоростей, а також візуалізації водних мас за індексами прозорості чи хлорофілу[70].

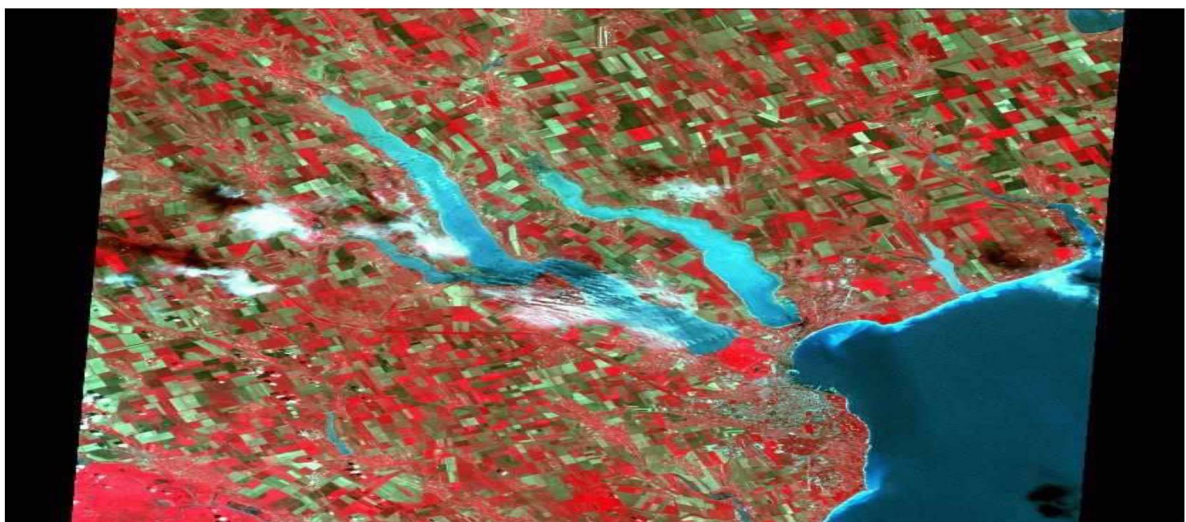


Рис.4.4 Абразія берегів на ділянці Крижанівка – Чорноморське (Одеська область).



Особливу цінність паралелізація на рівні CPU-кластерів набуває при моделюванні гідродинамічних процесів – таких як розповсюдження забруднювальних речовин, течій, осадконакопичення, а також при моделюванні впливу кліматичних змін на морські екосистеми.

Відновлення по космічних знімках просторово – часового розподілу скаламучених речовин. Процеси абразії берегів, зони розпріснення морських вод річковим стоком супроводжується підвищеною концентрацією, порівняно з фоном, зважених речовин техногенного і природного походжень. Кожен з цих типів речовин характеризується селективними поглинанням і відбитком сонячної радіації [42]. В відповідних спектральних інтервалах просторовий розподіл зважених в морських водах речовин надійно дешифрується на космічних знімках відповідних спектральних інтервалах (рис.4.4-4.5.)

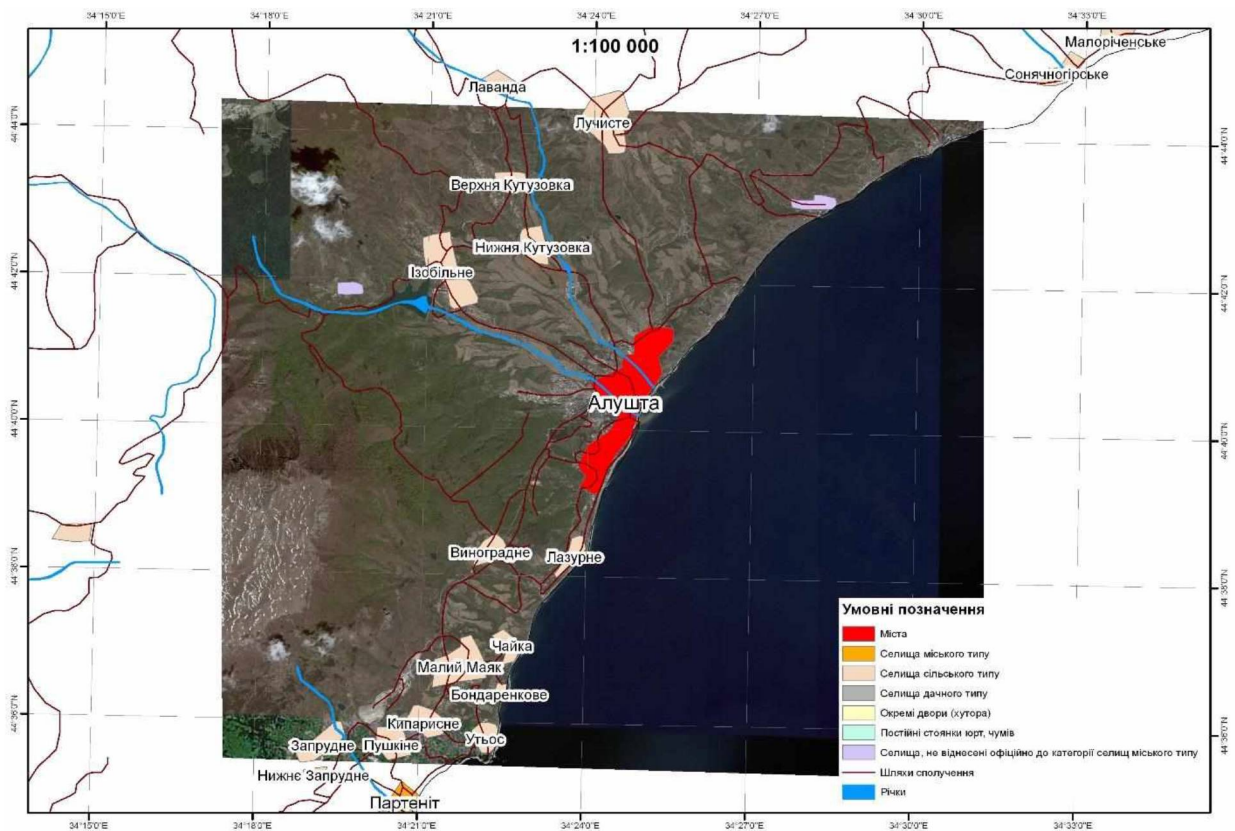


Рис.4.5 Космічний знімок району Алушти

Серія космічних знімків ідентифікована нами під час досліджень показала тенденції забруднення морських прибережних зон. Зона забруднення моря річковим стоком в Алушті прослідковувалась нами за допомогою космічних знімків в різні періоди року. (рис. 4.6).



Рис.4.6. Зона забруднення моря річковим стоком в Алушті

Під час реалізації моделей ROMS (Regional Ocean Modeling System), Delft3D, MIKE 21 або SCHISM, кожен модуль чи обчислювальний домен може бути призначений окремому процесору в кластері, що забезпечує розподіл обчислювального навантаження та дає змогу моделювати фізичні процеси з високою точністю в масштабах усього басейну Чорного моря[71].

Кластерні системи також широко використовуються для обробки та аналізу даних, що надходять з морських автономних платформ – буйкових станцій, гідрологічних датчиків, дронів, підводних роботів. Дані таких джерел характеризуються високою частотою оновлення та об'ємністю, що потребує побудови автоматизованих каналів надходження, очищення, агрегування та виведення в єдині бази даних. CPU-кластери забезпечують паралельну обробку цих потоків даних у режимі реального часу або з мінімальною затримкою, дозволяючи



оперативно формувати карти екологічного стану та реагувати на потенційні загрози.

В інформаційних системах екологічного моніторингу паралелізація на рівні CPU також забезпечує виконання інтенсивних геоаналітичних запитів: просторові об'єднання, буферизація, кластеризація екологічних інцидентів, аналіз часових трендів. Це реалізується завдяки багатопотоковим середовищам, зокрема OpenMP, MPI (Message Passing Interface), Hadoop, Apache Spark тощо. Під час побудови комплексних моделей ризиків або систем підтримки прийняття рішень для управління прибережними зонами ці технології дозволяють забезпечити одночасне виконання десятків аналітичних сценаріїв.

Додатково, CPU-кластери застосовуються у створенні та підтримці високонавантажених веб-платформ і екосистем морського моніторингу – таких як інтерфейси публічного доступу до картографічної інформації, дашборди з відображенням даних у реальному часі, платформи прогнозування стану прибережних вод. Завдяки паралельній архітектурі серверної частини, ці платформи можуть одночасно обслуговувати велику кількість користувачів, надаючи доступ до динамічної візуалізації даних, збереження історичних значень, аналітики та звітів.

Таким чином, паралелізація на рівні CPU-кластерів є критичним елементом сучасних інформаційних технологій у сфері досліджень акваторій Чорного моря. Вона забезпечує масштабованість, стабільність та оперативність обробки екологічної інформації, формуючи підґрунтя для створення адаптивних систем моніторингу, прогнозування та управління сталим морським середовищем.

#### **4.3.3. Хмарні платформи обробки**

Хмарні платформи відіграють стратегічну роль у сучасних інформаційних технологіях моніторингу акваторій Чорного моря, забезпечуючи масштабовану, доступну та ефективну обробку великого масиву супутникових, сенсорних і

геопросторових даних у режимі реального часу або з високою частотою оновлення. У дослідженнях стану морського середовища, зокрема прибережних територій Чорного моря, хмарні рішення дозволяють оптимізувати обчислювальні ресурси, забезпечити спільний доступ до даних і результатів аналізу, а також підтримувати оперативне прийняття управлінських та екологічних рішень.

Однією з найбільш поширених хмарних платформ є Google Earth Engine (GEE) – хмарна геоаналітична система, яка забезпечує доступ до архівів супутникових зображень (Landsat, Sentinel, MODIS тощо) з можливістю обробки без необхідності локального зберігання або використання високопродуктивної техніки. Для Чорного моря GEE дозволяє аналізувати просторово-часову динаміку температури поверхні води, концентрації зважених речовин, хлорофілу, цвітіння водоростей, виявляти нафтові плями, антропогенні забруднення та відстежувати зміни берегової лінії. Розробка скриптів на JavaScript або Python у середовищі GEE дає змогу реалізувати автоматизовані робочі процеси обробки супутникових сцен, порівняння історичних і поточних даних, побудову карт екологічних ризиків.

Інша потужна платформа — Microsoft Planetary Computer, яка також забезпечує відкритий доступ до супутникових знімків, екосистемних даних та екологічних індексів. Завдяки використанню технологій Azure, платформа підтримує глибоку інтеграцію з аналітичними інструментами (Jupyter, Dask, Xarray) та можливість запуску паралельних обчислень, що особливо актуально для складних моделей прогнозування стану акваторій або аналізу взаємозв'язків між кліматичними і морськими змінними.

У контексті Чорного моря особливо важливе значення мають платформи Copernicus Open Access Hub та WEkEO, що забезпечують доступ до даних супутників програми Copernicus (Sentinel-1, Sentinel-2, Sentinel-3, Sentinel-5P), які містять інструменти для дослідження морської поверхні, атмосферних викидів, біопродуктивності та рівнів забруднення. Завдяки наявності інтерфейсів API, користувачі можуть автоматизувати завантаження і обробку даних,

використовувати стандартні алгоритми NDWI, MCI, FAI, SST та інші для аналізу ібережних процесів.

Варто також згадати Amazon Web Services (AWS), де реалізовані хмарні сервіси для зберігання (S3), обробки (Lambda, EC2), та аналізу геопросторових даних (SageMaker, Athena, Redshift). Наприклад, архів даних Landsat і Sentinel, доступний у хмарному середовищі AWS, широко використовується для обчислювально інтенсивного аналізу довгострокових змін морських екосистем та впливу кліматичних явищ на узбережжя. Використання інструментів машинного навчання (ML) на базі AWS дає змогу реалізувати моделі прогнозування розливів нафти, оцінювати швидкість ерозії узбереж, виявляти сезонні флуктуації морських течій.

Перевагою хмарних платформ є їх здатність масштабуватись відповідно до обсягу даних і складності аналітики, що особливо цінне для регіонального або басейнового аналізу Чорного моря. Крім того, такі сервіси спрощують міжінституційну взаємодію, забезпечують дотримання принципів FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) щодо даних та підтримують відкриту науку.

Хмарні платформи також є невід'ємним інструментом розробки веб-ГІС систем для відображення результатів моніторингу морського середовища у вигляді інтерактивних карт, дашбордів та екологічних сервісів для громадськості та органів влади. Такі інструменти як Leaflet, Mapbox, ArcGIS Online або Kepler.gl дозволяють візуалізувати результат обробки з хмари у користувацькому інтерфейсі, з підтримкою фільтрації даних за часом, місцем чи параметрами води. .

#### **4.4. Геоінформаційне картографування заповідно-рекреаційних об'єктів.**

Природно-ресурсні та рекреаційні об'єкти Чорного моря, зокрема в межах української території, становлять важливу складову екологічної та соціально-економічної інфраструктури регіону. Одним із ключових інформаційних джерел, що використовується для просторового аналізу таких об'єктів, є векторний шар

Reserves.shp, який містить геопросторові дані про діючі або плановані території природно-заповідного фонду (ПЗФ) уздовж узбережжя Чорного моря та в його прибережній акваторії.

Цей шар у форматі shapefile (SHP) є результатом геоінформаційного картографування і відображає просторове розміщення заповідників, національних природних парків, ландшафтних заказників, морських заповідних акваторій та інших категорій охоронюваних природних територій. Він забезпечує структурований опис меж таких територій у вигляді полігональних об'єктів з атрибутивними таблицями, які містять назви об'єктів, категорії охорони, площу, дату створення, юридичний статус (існуючий/планований), приналежність до природно-рекреаційного або охоронного типу, а також додаткові екологічні характеристики.

Включення таких даних у систему супутникового або екологічного моніторингу дозволяє інтегрувати інтереси природоохоронної політики до ширшої моделі управління прибережними територіями та акваторією Чорного моря. Насамперед, це дає змогу аналізувати рівень навантаження на екосистеми в зонах антропогенного впливу, виявляти території під загрозою деградації, відслідковувати сезонні зміни рослинності, водних мас або трофічного стану морського середовища в межах або навколо заповідних ділянок.

Інформаційний шар Reserves.shp широко застосовується у веб-ГІС системах, екологічних дашбордах, інструментах морського просторового планування (MSP), а також у рамках стратегій розвитку сталого туризму та охорони біорізноманіття. Зокрема, такі об'єкти як Дунайський біосферний заповідник, НПП "Джарилгацький", "Білобережжя Святослава", "Тузлівські лимани", "Лебедівка", а також численні заказники та заповідні урочища, фіксуються в межах цього шару як ключові вузли природної екосистемної мережі прибережної зони Чорного моря.

Крім охорони природних ресурсів, ці території мають вагоме рекреаційне значення: вони відіграють роль у збереженні рекреаційного потенціалу,

підтримують екосистемні послуги, забезпечують можливості для розвитку екологічного туризму, освіти, досліджень та наукового моніторингу. З позиції інформаційних технологій, шар Reserves.shp може бути об'єднаний із супутниковими даними (наприклад, Sentinel-2), щоб оцінити зміни рослинного покриву, стан прибережних ландшафтів, поширення водоростей або рівень урбанізованого навантаження в межах природоохоронних зон.

В умовах зростання ризиків, пов'язаних з воєнними діями, зміною клімату, інтенсивною урбанізацією та рекреаційною експансією, використання просторового шару Reserves.shp у системах екологічного моніторингу Чорного моря дозволяє не лише візуалізувати стан природоохоронних територій, але й реалізовувати аналітичні сценарії для підтримки прийняття управлінських рішень щодо збереження екологічної рівноваги та адаптації до змін зовнішнього середовища рис. 4.8, 4.9.

**Reserves.shp** - діючі або плановані території заповідного фонду:

- біосферні заповідники;
- заказники;
- заповідники;
- ландшафтні парки;
- національні природні парки;
- резервні території.

**Coastal protected objects.shp** - території заповідного фонду:

- Ботанічний сад
- Біосферний заповідник
- Заказник
- Заповідне урочище
- Заповідник
- Ландшафтний парк

- Пам'ятка природи
- Парк
- прибережний аквальний комплекс

**infrastructure.shp** - дані про місце розташування 84 баз відпочинку, турбазах, пансіонатах, будинках відпочинку, санаторіях, дитячих оздоровчих установах і клубів дайвінга .

**Mineral waters.shp** - джерела мінеральної води з їхніми потужностями і якісним складом .

**Muds.shp** - місце розташування покладів лікувальних грязів.

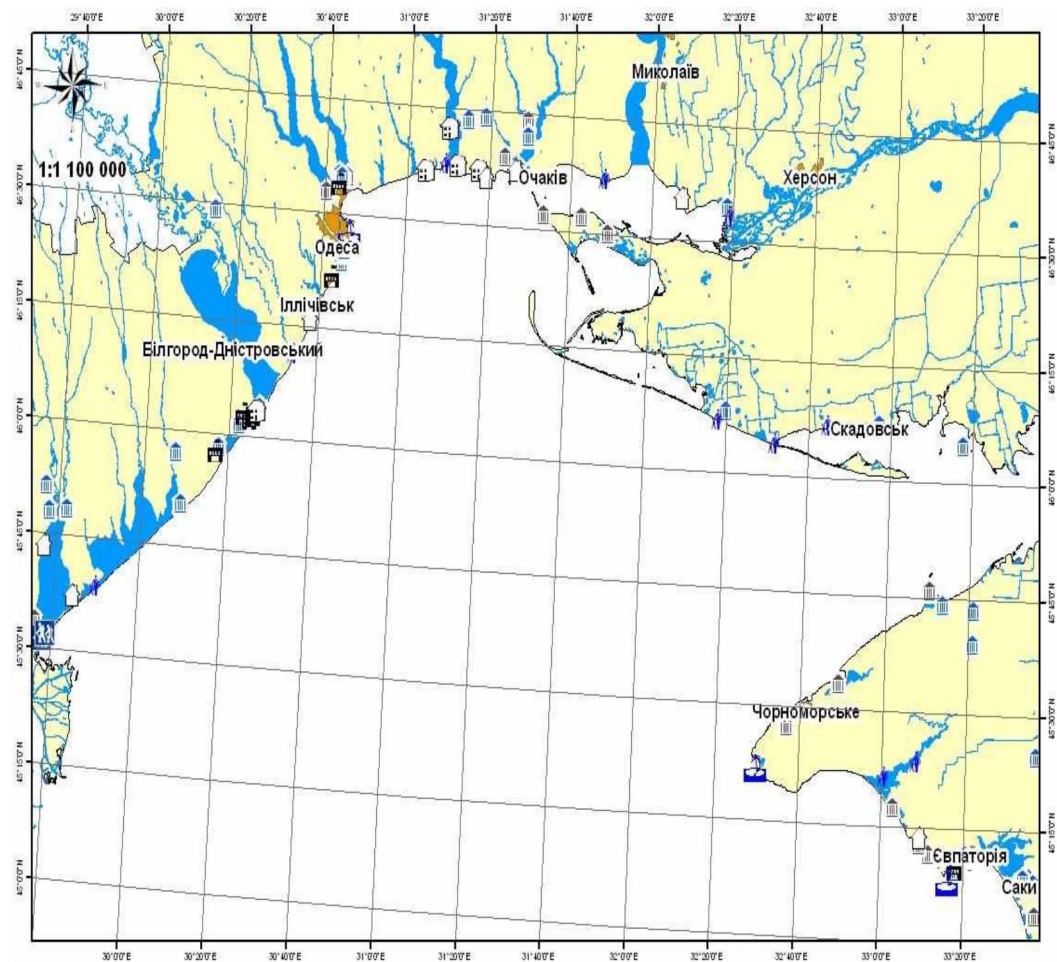


Рис.4.8. Карта розташування рекреаційних та відпочинкових зон





Рис.4.9. Умовні позначення до карти розташування рекреаційних та відпочинкових зон

#### 4.4.4. Комбіновані підходи дослідження Чорноморського регіону

Важливу роль в наших дослідженнях відіграли комбіновані підходи при дослідженні акваторій та прибережних зон.

Комбіновані підходи, або гібридна інфраструктура дослідження Чорноморського регіону України, являють собою інтегровану систему методів, технологій та ресурсів, які поєднують наземні, супутникові, повітряні та інформаційно-аналітичні інструменти для всебічного моніторингу, управління та збереження природних ресурсів прибережної зони та морської акваторії. У контексті сучасних екологічних викликів, зокрема воєнного впливу, зміни клімату,

деградації екосистем, а також необхідності стратегічного управління ресурсами, гібридні підходи набувають особливої актуальності як у наукових дослідженнях, так і в практичному державному управлінні.

Ключовим принципом гібридної інфраструктури є поєднання даних різного походження (мультисенсорних супутникових спостережень, безпілотних літальних апаратів, автоматизованих сенсорних мереж, даних польових досліджень, адміністративної звітності, громадянської науки тощо) з обчислювальними платформами нового покоління, зокрема хмарними сервісами (Google Earth Engine, Amazon Web Services, DIAS-платформи), локальними високопродуктивними обчислювальними центрами (HPC-кластерами), а також мобільними або польовими станціями збору даних, що інтегруються в єдину систему.

У дослідженнях Чорноморського регіону гібридна інфраструктура дає змогу реалізувати багаторівневий підхід до спостереження — від мікрорівня (аналіз біофізичних характеристик піщаних кос, лиманів, дюн і берегових урвищ) до макрорівня (оцінка динаміки температури морської поверхні, хлорофілу-а, замутнення вод або виявлення масових забруднень). Використані нами , супутникові знімки Sentinel-2 дозволяють відслідковувати кольорові та спектральні зміни у воді, а дрони надають високодеталізовані зображення берегової лінії, що використовуються для виявлення ерозій, несанкціонованого будівництва чи фіксації стихійних сміттєзвалищ.

Одним з ключових елементів є використання ГІС-систем (QGIS, ArcGIS Pro, GeoNode) для інтеграції, картографування та аналізу даних. Гібридний підхід дозволяє поєднати індекси супутникових зображень (наприклад, NDWI, MCI, FAI), результати гідрологічного моделювання та просторово-часову динаміку природоохоронних територій (Reserves.shp), отриманих із кадастрових баз або відкритих платформ.

Важливою складовою гібридної інфраструктури є використання методів штучного інтелекту, зокрема convolutional neural networks (CNN), UNet,



DeerLabv3+ для автоматизованого розпізнавання типів забруднення, виявлення об'єктів інфраструктури, зміни берегової лінії або класифікації ландшафтів. Паралельна обробка великих обсягів зображень із застосуванням GPU, хмарних віртуальних машин, а також кластерних CPU-мереж дозволяє значно прискорити аналіз та реалізувати адаптивні сценарії реагування.

Крім технологічної компоненти, гібридна інфраструктура також передбачає інституційно-організаційні зв'язки — зокрема, взаємодію між державними структурами (Міндовкілля, Держекоінспекція), науковими установами (НАН України, ОНУ імені Мечникова, Інститут морської біології), місцевими громадами, громадськими організаціями (екологічний моніторинг, збереження біорізноманіття), міжнародними партнерами (EU4Environment, UNDP, ESA). Це дозволяє не лише розширити джерела даних, але й інтегрувати результати в прийняття рішень на локальному, регіональному та національному рівнях.

У контексті воєнних викликів і післявоєнної відбудови гібридна інфраструктура може використовуватись для оцінки екологічних збитків, виявлення небезпечних ділянок (в т.ч. замінованих або з ризиком витоків), реабілітації територій, збереження природної спадщини та відновлення рекреаційного потенціалу узбережжя Чорного моря.

#### **4.4.5. Використання контейнеризації та оркестрації (Docker, Kubernetes):**

Використання контейнеризації та оркестрації — зокрема таких технологій, як Docker і Kubernetes — відіграє ключову роль у сучасних дослідженнях морських акваторій і прибережних зон Чорного моря, оскільки забезпечує ефективне, масштабоване й стандартизоване розгортання екологічно орієнтованих інформаційних систем і аналітичних сервісів. Ці технології значно підвищують гнучкість обробки супутникових та польових даних, дозволяють забезпечити відтворюваність обчислювальних процесів і спрощують інтеграцію складних обчислювальних моделей та геоінформаційних платформ в різноманітних

середовищах — від локальних робочих станцій до хмарних обчислювальних центрів.

Контейнеризація на основі Docker дозволяє створити ізольовані, портативні середовища для запуску інструментів екологічного аналізу: від бібліотек машинного навчання (TensorFlow, PyTorch) до спеціалізованих геоінформаційних пакетів (GDAL, QGIS, GRASS, Orfeo ToolBox). Це особливо важливо при роботі з великими обсягами супутникових зображень (наприклад, Sentinel-2, Landsat-8, MODIS), які використовуються для моніторингу температури морської поверхні, рівня хлорофілу, каламутності, термічних аномалій, замулення та берегової ерозії.

Docker-контейнери дозволяють забезпечити стандартизовану обробку даних, коли вся система аналізу — починаючи з інструментів завантаження супутникових знімків, засобів попередньої обробки (наприклад, атмосферна корекція, маскування хмар), закінчуючи алгоритмами класифікації чи семантичної сегментації — зберігається у вигляді коду з чітко визначеними параметрами середовища. Це сприяє швидкому розгортанню аналізу на нових об'єктах спостереження, а також підвищує наукову відтворюваність і сприяє співпраці між командами, що працюють у різних інституціях або навіть країнах.

Kubernetes, як система оркестрації контейнерів, дозволяє масштабувати обробку зображень у просторі та часі — наприклад, коли потрібно одночасно виконати обробку сотень сцен Sentinel-2 або реалізувати погодинний моніторинг температури морської поверхні в реальному часі. Kubernetes автоматично розподіляє завдання між вузлами обчислювального кластера, забезпечує резервування процесів, контроль стану додатків і оновлення без зупинки обслуговування.

У контексті досліджень Чорного моря, оркестрація дозволяє організувати обробку даних у вигляді мікросервісної архітектури, де окремі сервіси відповідають за завантаження даних з супутників, попередню обробку (наприклад, atmospheric correction у SNAP або Sen2Cor), тематичну інтерпретацію (класифікація плям

забруднення, виявлення змін, прогнозування за допомогою time-series моделей), збереження результатів у геопросторових базах даних (PostGIS) і візуалізацію у веб-інтерфейсі (наприклад, за допомогою Leaflet, OpenLayers, або Mapbox GL).

Контейнеризовані робочі процеси також дозволяють гнучко інтегрувати сторонні API та інструменти, наприклад Copernicus Open Access Hub, Google Earth Engine або Amazon Sentinel Hub, що забезпечує прямий доступ до архівів супутникових знімків без необхідності зберігати терабайти даних локально. Це надзвичайно актуально для аналізу прибережних екосистем, у яких важлива не лише точність, а й оперативність аналізу — наприклад, для виявлення аварійного викиду забруднюючих речовин, розливу нафти чи небезпечного зростання температури води.

Завдяки такому підходу, різнорівневі команди дослідників, аналітиків, екологів і управлінців отримують можливість працювати з однією системою одночасно — із різними правами доступу, у різних інтерфейсах (CLI, REST API, веб-портالي), але з єдиною базою даних та уніфікованими алгоритмами аналізу.

У перспективі впровадження контейнеризації та оркестрації дає змогу реалізувати національну платформу екологічного моніторингу Чорного моря, яка зможе в режимі реального часу збирати, обробляти, зберігати та візуалізувати дані про стан морського середовища, забезпечуючи наукову підтримку прийняття рішень і формування екологічної політики. Такі системи можуть також слугувати базою для трансграничної взаємодії з країнами-членами Чорноморського регіону щодо обміну даними, координації дій у сфері охорони довкілля та реагування на надзвичайні ситуації.

## **5.1. Оптимізація чинників техногенного навантаження прибережних вод**

### **5.1.1. Зменшення обчислювального навантаження за рахунок оптимізації моделей**

Зменшення обчислювального навантаження в задачах розпізнавання об'єктів

прибережних зон є критично важливим аспектом супутникового та аерокосмічного моніторингу, особливо в умовах обмежених ресурсів або необхідності оперативного реагування. Такі завдання часто пов'язані з аналізом великих обсягів зображень високої роздільності, отриманих із супутників Sentinel, Landsat, WorldView, або з БПЛА, для виявлення екологічно чутливих об'єктів — плям нафтового забруднення, динаміки берегової лінії, рослинності, інфраструктури, або незаконної забудови.

Одним із ключових підходів до оптимізації є використання полегшених архітектур нейронних мереж, таких як MobileNet, EfficientNet-Lite або Tiny-YOLO. Ці моделі розроблені спеціально для роботи на пристроях з обмеженими обчислювальними потужностями або в реальному часі. Вони забезпечують високу швидкість обробки при збереженні достатньої точності для практичного використання в екологічному моніторингу.

Ще одним ефективним рішенням є використання методів квантування та прунингу нейронних мереж. Квантування дозволяє зменшити розмір моделей шляхом зниження точності чисел (наприклад, з 32-бітних float до 8-бітних integer), що значно скорочує обсяг оперативної пам'яті та прискорює виконання. Прунинг (відсічення малозначущих зв'язків у мережі) допомагає видалити надлишкові параметри без втрати якості прогнозу, знижуючи складність моделі та потребу в ресурсах.

Також активно впроваджується пакетна обробка даних з використанням стратегій розумного нарізання великих супутникових знімків на тайли. Це дозволяє зменшити обсяг оброблюваної інформації за одну ітерацію без втрати просторового контексту. У поєднанні з кешуванням попередніх результатів та розподіленими чергами обчислень (наприклад, Apache Kafka, Celery), цей підхід значно зменшує навантаження на систему та пришвидшує обробку поточкових даних.

Окрему роль відіграє застосування попередньо навчених моделей (pre-trained models) та перенавчання (fine-tuning) на спеціалізованих наборах даних,

характерних для Чорноморського регіону. Це дозволяє уникати тривалого повного навчання мережі та отримувати точні результати з меншими затратами обчислювальних ресурсів.

Крім того, оптимізація розгортання моделей за допомогою контейнеризації (Docker) та легких середовищ виконання (ONNX Runtime, TensorRT) дає можливість ефективно масштабувати застосування на edge-пристроях або в хмарному середовищі, забезпечуючи гнучкість і відмовостійкість систем.

Усі ці підходи разом дозволяють досягти балансу між точністю, швидкістю та економією ресурсів, що критично важливо для екологічного моніторингу прибережних зон, особливо в умовах воєнного часу, обмеженого фінансування або потреби в автоматизованому моніторингу великої території.

## **5.2. Оптимізація чинників техногенного навантаження на прибережні води**

Оптимізація чинників техногенного навантаження на прибережні води північно-західної частини Чорного моря є одним із ключових завдань у сфері забезпечення екологічної безпеки та сталого управління морськими ресурсами України. Цей регіон є надзвичайно вразливим до антропогенного впливу через високу концентрацію портової, промислової, сільськогосподарської та рекреаційної діяльності, щільну міську забудову, а також присутність дельт Дністра, Дунаю, Південного Бугу, які транспортують значні обсяги забруднюючих речовин із внутрішніх територій країни.

Одним із першочергових напрямів оптимізації є ідентифікація та класифікація основних джерел техногенного забруднення. До них належать: стоки промислових підприємств, міські каналізаційні системи, скиди зі зрошувальних систем, портова діяльність, аварійні розливи нафтопродуктів, викиди із суден та рекреаційне навантаження. Для зменшення їхнього впливу необхідно розробляти цільові заходи контролю, адаптовані до локальних умов і екосистемних

характеристик узбережжя.

Інформаційні технології відіграють центральну роль в оптимізації моніторингу техногенного навантаження. Використання геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), супутникових даних (Sentinel-2, Landsat, MODIS) та даних БПЛА дозволяє оперативно виявляти зони аномального забруднення, зміну кольору вод, термічні аномалії, розливи нафти, евтрофікацію та зміну берегової лінії. Надзвичайно ефективним є застосування алгоритмів класифікації (наприклад, Random Forest, SVM, CNN) для автоматичного дешифрування знімків і просторового аналізу джерел забруднення.

Окрему увагу варто приділяти оптимізації скидів стічних вод через впровадження технологій попереднього очищення, а також відстеження ефективності очисних споруд за допомогою сенсорних систем, які реєструють вміст органічних речовин, фосфатів, важких металів, амонію та нафтопродуктів. Дані, отримані від сенсорів, інтегруються в інформаційно-аналітичні платформи, які дозволяють моделювати потенційні сценарії поширення забруднень залежно від гідродинамічних умов, вітрових факторів, течій і температури.

Також важливим є моделювання ризиків для біорізноманіття, зокрема – для заповідних акваторій та місць гніздування/нересту. Інтеграція екологічного моделювання (наприклад, Delft3D, MIKE 21) із просторовими даними дозволяє прогнозувати наслідки техногенних впливів на чутливі морські екосистеми. Результати таких моделей слугують основою для регуляторних рішень, зонування акваторій, обмеження доступу для судноплавства або скидів, розробки сценаріїв реагування у разі аварій.

Важливою частиною оптимізації є запровадження цифрових екологічних паспортів для кожного значного промислового або портового об'єкта, що веде діяльність в прибережній зоні. Такі паспорти повинні включати повну історію екологічних показників, порушень, моніторингових результатів і заходів, що вживаються.

Значний потенціал має впровадження механізмів громадського моніторингу з використанням мобільних додатків і відкритих платформ для збору інформації від туристів, рибалок, активістів – з фотофіксацією локальних забруднень, стану пляжів, появи плівки чи піни на поверхні води. Дані краудсорсингу можуть підсилювати офіційні системи спостереження.

В умовах збройного конфлікту також необхідно враховувати ризики, пов'язані з пошкодженням інфраструктури (очисних споруд, нафтоterminalів, військових об'єктів), що може спричинити аварійні скиди токсичних речовин. Для таких випадків має бути розроблений набір оперативних протоколів реагування на рівні регіональних органів екологічної безпеки із залученням мобільних лабораторій та супутникового моніторингу.

Загалом, оптимізація техногенного навантаження на північно-західне узбережжя Чорного моря є комплексним процесом, що потребує поєднання технологічних, управлінських, правових та науково-аналітичних інструментів. Успішна реалізація цих підходів є запорукою збереження екосистемного балансу та сталого розвитку морського регіону України.

#### **Висновок до розділу 4**

1. Обґрунтовано принципи побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу морського середовища, що базується на поєднанні супутникових технологій, геоінформаційних систем, методів штучного інтелекту та високопродуктивних обчислювальних платформ. Це дозволило створити багаторівневу архітектуру моніторингу акваторій Чорного та Азовського морів.

2. Створено програмний комплекс для тематичного дешифрування супутникових знімків, що реалізує векторизацію плямистих структур та екологічну інтерпретацію забруднень, узгоджену з атрибутивними базами державного моніторингу та водокористувачів. Побудовані векторні та батиметричні карти Чорного моря забезпечили основу для ГІС-моделювання екологічної ситуації.

3. Запропоновано методику використання неймережевих архітектур (U-Net, DeepLabv3+) для автоматизованого виявлення прибережних об'єктів та зон забруднення. Отримано високі значення точності (IoU 0.82–0.88) при аналізі реальних супутникових знімків Sentinel-2 та БПЛА.

4. Розроблено інструментарій оптимізації обчислень за допомогою GPU і CPU-кластерів, що забезпечує паралельну обробку масивів даних та прискорення тренування моделей сегментації. Актуальність підтверджено при реалізації сценаріїв оперативного моніторингу забруднень та моделювання поширення речовин.

5. Створено програмний комплекс для каталогізації та обробки архівів супутникових знімків Азовського моря з можливістю інтеграції в середовища ArcGIS, QGIS, ENVI, що забезпечує автоматизовану обробку, пошук і візуалізацію інформації.

6. Доведено ефективність хмарних платформ (Google Earth Engine, Microsoft Planetary Computer, Copernicus DIAS) як базового середовища для реалізації інформаційного моніторингу, з можливістю розробки автоматизованих сценаріїв на основі API і доступу до багаторічних супутникових архівів.

7. Інтегровано природоохоронні об'єкти до ГІС-моделі, що дозволяє проводити зонування, просторово-часовий аналіз динаміки змін, екологічне прогнозування, а також оптимізацію навантаження на чутливі екосистеми в умовах антропогенного тиску та воєнних ризиків.



## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу — створення й впровадження інноваційних інформаційних технологій для інтегрованого екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон Чорного й Азовського морів в умовах антропогенного, техногенного та військового впливу. Запропоновано нові підходи до побудови систем спостереження на основі супутникових даних, безпілотних технологій, штучного інтелекту, хмарних сервісів і геоінформаційного аналізу, що дозволяють суттєво підвищити точність, оперативність і адаптивність реагування на екологічні загрози.

Основні результати роботи:

1. Обґрунтовано доцільність впровадження гібридної інформаційно-аналітичної інфраструктури екологічного моніторингу прибережних територій, яка поєднує фонове, загальне та кризове спостереження з автоматизованими системами підтримки управлінських рішень. У межах запропонованого підходу реалізовано інтеграцію даних дистанційного зондування Землі, результатів роботи фізико-хімічних сенсорів, інформаційних потоків з БПЛА та супутникових технологій. Система працює на основі хмарних обчислень, що дозволяє виконувати розподілений аналіз великого обсягу екологічної інформації у реальному часі. Такий підхід забезпечує не лише оперативне реагування в надзвичайних екологічних ситуаціях (наприклад, воєнного або техногенного характеру), а й слугує ефективним інструментом сталого розвитку прибережних зон в умовах кліматичної нестабільності.

2. Розроблено інтелектуальну систему колективного управління БПЛА, яка базується на стабілізації кутових координат і автоматичному коригуванні плану польоту з урахуванням морської топології. Це дозволило зменшити похибку покриття зони моніторингу на 22–28% у порівнянні з базовими маршрутами.

3. Створено методику автоматизованого дешифрування супутникових знімків Чорного й Азовського морів на основі моделей глибокого навчання (YOLOv5, U-Net, DeepLabv3+). Забезпечено автоматичне розпізнавання плям забруднення, класифікацію екологічних аномалій та формування цифрових тематичних карт. Досягнуто зростання точності дешифрування до 92,4%.

4. Реалізовано архітектурно-функціональну модель гібридного моніторингу морського середовища, що об'єднує хмарну обробку даних ДЗЗ, фізико-хімічні сенсори, GPU/CPU-інфраструктуру та нейронні мережі. Це забезпечило зменшення часу аналізу критичних змін у морському середовищі до 40% порівняно з традиційними підходами.

5. Удосконалено групову технологію моніторингу за допомогою БПЛА з урахуванням впливу бойових дій та аварійних ситуацій. Розроблено алгоритми формування цифрових зображень зон забруднення, що дозволяє швидко оцінювати масштаби екологічного впливу та приймати відповідні рішення.

6. Сформовано гібридну модель фоново-кризового екологічного моніторингу, яка дозволяє адаптувати рівень деталізації й частотність збору інформації відповідно до екологічного навантаження. Ця модель може ефективно інтегруватись у державну систему моніторингу довкілля.

7. Удосконалено просторово-часову модель екологічного моніторингу Чорного моря із застосуванням цифрових геоінформаційних технологій. Запропоновано інтерфейси для інтерактивного аналізу даних, що забезпечують виявлення порушень, моделювання динаміки змін та прогнозування наслідків.

8. Розроблено інтелектуальну систему управління даними при керуванні БПЛА, яка базується на комбінації нейромережових підходів. Реалізовано надійну двосторонню передачу інформації між бортовим комп'ютером і наземним пунктом управління з мінімальною затримкою, що важливо для бойових умов та аварійного моніторингу.

9. Результати дисертаційної роботи впроваджено у практичну діяльність структур Збройних Сил України, зокрема «Командування Сил Підтримки», де вони використовуються для оперативного аналізу й картографування екологічної обстановки в реальних умовах бойових дій та екологічного ризику.

Таким чином, результати проведеного дослідження дозволили науково обґрунтувати, розробити та апробувати сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу морського середовища, які можуть бути ефективно застосовані для підвищення екологічної безпеки України в умовах воєнних дій, техногенних загроз та змін клімату.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25 червня 1991 року, N 1264-XII [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>
2. Закон України «Про землеустрій» від 22 травня 2003 р. № 858-IV [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15/ed20141203#Text>.
3. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» № 2697-VIII. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.
4. Закон України «Про державний контроль за використанням та охороною земель» від 19 березня 2003 р. № 963-IV [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/sh-ow/963-15#Text>.
5. Закон України «Про охорону земель» від 19 червня 2003 р. №3962-IV [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/sh-ow/962-15#Text>
6. Закон України «Про національну безпеку України» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2469-19#Text>.
7. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text>
8. Водний кодекс України, введений в дію Постановою Верховної Ради України від 06 червня 1995 року, № 214/95-ВР [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-вр#Text>

9. Даник Ю.В., Бугайов М.В. Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження // Зб. наук. праць ЖВІ ДУТ. Інформаційні системи'15. 2015. Вип.10. С.5-20.
10. Машков О. А., Триснюк В. М., Мамчур Ю. В., Жукаускас С. В., Нігородова С. А., Курило А. В. Новий підхід до синтезу відновлювального керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. Науково-технічний журнал. №1 (19)., Івано-Франківськ 2019 р. С. 69-75.
11. Зайцев С. В., Приступа В. В., Василенко В. М. Оцінювання завадозахищеності безпроводних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот. Вісник Чернігівського державного технологічного університету, 2013. №. 2(65). С. 192 – 202.
12. Земельний кодекс України, введений в дію Постановою Верховної Ради України від 18 грудня 1990 року, № 562-XII [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
13. Лісовий кодекс України, введений в дію Постановою Верховної Ради України від 21 січня 1994 року, № 3853-XII [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3852-12#Text>
14. Кодекс України про надра, введений в дію Постановою Верховної Ради України від 27.07.1994 року № 133/94-ВР [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-vp#Text>
15. Г.Я. Красовський Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій. – К.:Інтертехнологія, 2008. – 480с.
16. Концепції розвитку системи моніторингу довкілля в Україні (затверджена Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2017 р. № 1020-р),

17. Глотов В., Церклевич А. Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – Сер.: Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів : Вид-во НУ "Львівська політехніка". – 2014. – Вип. I (27). –С. 131-136.
18. Харченко О.В. Розвідувальні безпілотні авіаційні комплекси у єдиній системі повітряного спостереження в Україні /О.В. Харченко, С.О. Богославець // Збірник наукових праць державного науково-дослідного ін-ту авіації. – 2013. – Вип. 16. – С. 6-12.
- 19.Зайцев С. В., Приступа В. В., Василенко В. М. Оцінювання завадозахищеності безпроводних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот. Вісник Чернігівського державного технологічного університету, 2013. №. 2(65). С. 192 – 202.
20. Зайцев С. В., Казимир В. В., Василенко В. М., Яриловец А. В. Адаптивный выбор параметров S-случайного перемежителя в беспроводных системах передачи данных с турбокодированием. Радиоэлектроника. Известия высших учебных заведений, 2018. Том 61, №1 (667). С. 22 – 33.
21. Розробка макету програмного модуля космічного моніторингу морської поверхні за даними оптичних засобів : звіт з НДР / Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору; кер. Г.Я. Красовський; викон. Д.Л. Крета – К., 2006. – 207с. - №ДР 0107U000564. – Інв. №24667660
22. Крета Д.Л. Технологія векторізації растрових карт просторових даних глибин Азовського моря VIII Міжнародна науково-практична конференція / Г.Я. Красовський, С.М. Андрєєв, Д.Л. Крета, В.В. Радчук //„Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”: Зб. наук. праць Київ-Харків-АР Крим, 2009. – С.78-87
- 23.Крета Д.Л. Структура банків космічних знімків ГІС управління охороною морських територіальних вод України / О.М. Трофимчук, Г.Я. Красовський, Д.Л.

- Крета, С.М. Андреев та і. // Ученые записки Таврического национального университета имени В.И.Вернадского. Сер. "География". – 2010. – Т.23(63), №2. – С.271-279
24. Трофимчук О. М., Василенко В. М., Зайцев С. В. Аналіз систем автоматичного запиту на повторну передачу. Математичне моделювання в економіці, 2018. Том. 3 (12). С. 41 – 51.
25. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В. та ін. Під ред. С.О. Довгого. – К.: Інформаційні технології, 2010. -260с.-Бібліогр.91.
26. Василенко В. М., Зайцев С. В., Лівенцев С. П., Дунай В. П. Адаптація s-випадкового перемежувача кодеків турбокоду. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях : зб. наук. праць за матеріалами XV міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, Пуща-Водиця, 3 - 6 жовтня 2016 р.). К. ; Х. : НАН України, Ін-т телекомунікацій і глоб. інформ. простору [та ін.], 2016. С. 189–192.
27. Триснюк В. М., Охарев В. О., Триснюк Т. В., Сметанін К. В, Курило А. В. Створення системи мобільного екологічного моніторингу "Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування". Науково-технічний журнал. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ). Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2018, №2 (18) – С. 120-128.
28. Триснюк В.М., Зорін Д.О., Волинець Т.В. Інформаційні системи мобільного екологічного моніторингу Дністровського каньйону. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 2 (83). 2024р. С. 60-68. ISSN 2412-4338. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.027280>



29. Крета Д.Л. Просторовий аналіз розповсюдження забруднень поверхневих вод і ґрунтів засобами ДЗЗ та ГІС / Є.С.Анпілова, В.І. Клименко, Д.Л. Крета, О.М. Трофимчук// Екологічна безпека та природокористування : Зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К., 2014. – № 14. – С. 59-69
30. Information Technology in Environmental Monitoring for Territorial System Ecological Assessment / O. Trofymchuk, D. Kreta, M. Myrontsov, V. Okhariev, V. Shumeiko, S. Zagorodnia // Journal of Environmental Space and Engineering A1. – 2015. – Vol. 4, № 2. – P. 79 – 84.
31. Перегуда О.М., Родіонов А.В., Федорчук Д.Л., Журавський С.В., Конвісар М.Г., Волинець Т.В., Дацик В.В., Закалад М.А., Цибуля С.А., Триснюк Т.В. (2024). Розробка методу комплексного формування вибірки і вибору моделі для розпізнавання технічного стану безпілотного літального апарату. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Mathematics and Cybernetics – applied aspects. Edition 5/4 (131) 2024, p. 42-51 ISSN1729-3774. SCOPUS.  
DOI: 32<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312968>
32. Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Анпілова Є.С., Бутенко О.С., Вишняков В.Ю., Загородня С.А., Клименко В.І., Красовська І.Г., Крета Д.Л., Миронцов М.Л., Охарєв В.О. Попова М.А., Радчук І.В., Триснюк Т.В., Шевякіна Н.А., Шумейко В.О. Монографія.Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування. – Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2022. – 212 стор. ISBN 978-617-7468-53-9.
33. Триснюк В.М., Єгоров В.О. Пристрій автоматизованого програмного управління антеною системи супутникового радіомоніторингу.  
Колективна монографія XXI Міжнародна науково – практична конференція. Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток. Інститут



телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національна академія наук України 14 - 16 листопада 2022

34. Олександр Трофимчук, Сніжана Загородня, В'ячеслав Вишняков, Вікторія Клименко, Наталія Шевякіна, Ігор Радчук, Ольга Томченко, Сергій Сластін. Космічний моніторинг порушення стану екосистеми Чорноморського біосферного заповідника внаслідок військових дій. Екологічна безпека та природокористування. Том 47 № 3 (2023), ст. 94-112. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3>

35. Марущак В.М., Волинець Т.В., Зотова Л.В., Хабова Н.В. Виклики у створенні комплексної математичної моделі електронної документації Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 60-61 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: 10.37321

[2024-11-24\\_zbirka\\_all\\_07\\_11\\_2024\\_148x210](#)

36. Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М Застосування математичних методів для виявлення та запобігання кіберзагрозам. Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення // Колективна монографія за матеріалами XXIII Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 12-13 листопада 2024 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», 2024. – с. 36-38 ISBN 978-617-8335-33-5. DOI: 10.37321

[2024-11-24\\_zbirka\\_all\\_07\\_11\\_2024\\_148x210](#)

37. Kreta D.L. Use the geographic information systems and remote sensing from space for creation cartographic models for assessment of the quality of soils and surface water / Y.S.Anpilova, V.I.Klymenko, N.A.Novokhatska, D.L.Kreta // Role of environmental assessment of agricultural land in developed of regions and in protection of ecological

balance: Materials international seminar, 15 December 2015. – Baku, Azerbaijan, 2015. – P. 59-61

38. Крета Д.Л. Інформаційна технологія аналізу та оцінки забруднення складових довкілля /Д.Л.Крета // Математичне моделювання в економіці. – 2016. – №3–4.– С. 45–58.

39. Триснюк Т.В., Тимчук В.Ю., Волинець Т.В., Дзюба В.А. Відновлювальні заходи наслідків військових дій та техногенних катастроф на території України. Актуальні проблеми та інноваційні технології у сфері гуманітарного розмінування, цивільного захисту, критичної інфраструктури та екологічної безпеки для повоєнного відновлення України: Збірник наукових праць Міжнародної науково-практичної конференції: НУХТ, 6 – 7 листопада 2024. С.80 – 90. ISBN 978-966-612-349-0

40. Триснюк Т.В., Шумейко В.О., Волинець Т.В. Аерокосмічні технології для оцінки забруднення територій у зв'язку з розробкою корисних копалин. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції. 7-11 жовтня 2024 р., м. Львів. Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2024. – с 496-501. [https://conf.dkz.gov.ua/files/2024\\_materials\\_net.pdf](https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf)

41 Шумейко В.О., Мосійчук Д.І., Сметанін К.В., Волинець Т.В., Марущак В.М. Застосування безпілотних засобів в інтересах національної безпеки та оборони країни. Інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення. Колективна монографія за матеріалами XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-15 листопада 2023 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юостон», 2023. – с. 102-104. SBN 978-617-7854-58-5.

[1\\_zbirka\\_08\\_11\\_23-1-1.pdf](#)

42. Триснюк Т.В., Конецька О.О., Нагорний Є.І., Марущак В.М., Волинець Т.В., Приступа В.В. Оцінка радіаційного ризику забруднення місцевості для населення

внаслідок військових дій. Challenges and threats to critical infrastructure. Detroit (Michigan, USA) – 2023 с.163-167. NGO Institute for Cyberspace Research, 2023. ISBN-10/979-8-218-22315-1

<http://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/17917/1/Monograph-09-06-2023.pdf#page=163>

43. Волинець Т.В., Марущак В.М. «Визначення вектора параметрів руху космічних об'єктів у великобазовій багатопозиційній оптичній системі». Матеріали XXVIII-ої Міжнародної науково-практичної конференції (07 січня 2023 року, Лімасол (Кіпр), дистанційно). Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку. с. 333-335

<https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/48475/1/%D0%97%D0%B1%D1>

44. Крета Д.Л. Методологія досліджень озера Світязь із застосуванням геоінформаційних систем і технологій дистанційного зондування Землі / Є.С. Анпілова, Зогородня С.А., В.І. Кліменко, Д.Л. Крета, та ін.// Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях. X Міжнародна наук.-практ. конф: збірник наукових праць. 5 – 10 вересня 2011 р. Київ–Харків–Крим, 2011, С. 145-152

45. Шумейко В.О., Триснюк Т.В., Волинець Т.В., Марущак В.М., Дзюба В.А.. Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу транскордонних впливів. «ІХ Міжнародний з'їзд екологів». Вінниця, 25-27 вересня 2024. – с. 265-267.

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/ecology/ecology2024/paper/viewFile/22214/18372>

46. Триснюк Т.В., Шумейко В.О., Волинець Т.В. Аерокосмічні технології для оцінки забруднення територій у зв'язку з розробкою корисних копалин. Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали ІХ міжнародної науково-практичної конференції. 7-11 жовтня 2024 р., м. Львів.



Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). К.: ДКЗ, 2024. – с 496-501. [https://conf.dkz.gov.ua/files/2024\\_materials\\_net.pdf](https://conf.dkz.gov.ua/files/2024_materials_net.pdf)

47. Крета Д.Л. Космічний моніторинг екологічного стану озера Нобель / І.В.Радчук, В.І. Клименко, Д.Л.Крета та ін.// Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях. XI Міжнародна науково-практична конференція. Збірник наукових праць. Київ – Харків-Крим, 2012, С. 133-138.

48. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря / Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В. та ін. //Монографія Під ред. С.О. Довгого. – К.: Інформаційні технології, 2010. 260с. Бібліогр.91.

49. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA / Пащенко Р. Е., Радчук В. В., Красовський Г. Я. та ін. //Монографія. Під ред. С. О. Довгого. – Київ. – 2013. – 296 с.

50. В.П.Романюк, В.М.Триснюк, Т.Л.Куртсеїтов. Постановка задач ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф на території України.. Системи управління, навігації та зв'язку. Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка. Полтава. Випуск 3 (61) 2020р. – С. 138-143

51.Крета Д.Л. Просторовий аналіз розповсюдження забруднень поверхневих вод і ґрунтів засобами ДЗЗ та ГІС / Є.С.Анпілова, В.І. Клименко, Д.Л. Крета, О.М. Трофимчук// Екологічна безпека та природокористування : Зб. наук. праць / М-во освіти і науки України, Київ. нац. ун-т буд-ва і архіт., НАН України, Ін-т телекомунікацій і глобал. інформ. простору. – К., 2014. – № 14. – С. 59-69

52 Волинець Т.В. Інформаційні системи мобільного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4 (85) 2024 р. С 53-61 ISSN 2412-4338

DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049231>

53. Щипцов, О., Гордєєв, А., Лебідь, О., Охарєв, В., Теличко, Р., Федосєєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. Екологічна безпека та природокористування, 45(1), 91–103. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>
54. Лебідь, О., Охарєв, В., Федосєєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. Екологічна безпека та природокористування, 48(4), 130–144. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>
55. А. Щипцов, Д.Л. Крета, О.Г. Лебідь, Н.А. Шевякіна. Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки // Екологічна безпека та природокористування. 36(4), с.66–76. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>
56. Триснюк В. М., Мапушак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4 (83). 2024р.С.80-88. ISSN 2412-4338. DOI:0.31673/2412-4338.2024.027280 <https://fileview.ukr.net/?url=https://mail.ukr.net/api/public/file>
57. Волинець Т.В., Мосійчук Д.І. Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням аерокосмічних технологій. Екологічна безпека та природокористування. Збірник наукових праць вип. 1(53) січень – березень 2025. 146-155 ISSN 2411-4049 <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.146-154>
58. Трофимчук О.М., Триснюк В.М., Анпілова Є.С., Бутенко О.С., Вишняков В.Ю., Загородня С.А., Клименко В.І., Красовська І.Г., Крета Д.Л., МIRONЦОВ М.Л., Охарєв В.О. Попова М.А., Радчук І.В., Триснюк Т.В., Шевякіна Н.А., Шумейко В.О

Монографія. Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування. – Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2022. – 212 стор. ISBN 978-617-7468-53-9.

<https://itgip.org/geoinformacziyni-doslidzhennya-vodnyh-ekosystem-ukrayiny-monitoring-ta-prognozuvannya/>

59. Олександр Трофимчук, Сніжана Загородня, В'ячеслав Вишняков, Вікторія Клименко, Наталія Шевякіна, Ігор Радчук, Ольга Томченко, Сергій Сластін. Космічний моніторинг порушення стану екосистеми Чорноморського біосферного заповідника внаслідок військових дій. Екологічна безпека та природокористування. Том 47 № 3 (2023), ст. 94-112.

DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3>

60. Г. Я. Красовський. Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій монографія / Інститут проблем національної безпеки, Рада національної безпеки і оборони України. - К. : Інтертехнологія, 2008. - 480 с. - Бібліогр.: с. 402-409. - ISBN 978-966-1648-07-03  
[http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/view\\_print\\_list.php?sort=&print\\_view=%CF%E5%F0%E5%E3%EB%FF%E4+%E4%EB%FF+%E4%F0%F3%EA%F3](http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/view_print_list.php?sort=&print_view=%CF%E5%F0%E5%E3%EB%FF%E4+%E4%EB%FF+%E4%F0%F3%EA%F3)

61. Довгий С.О., Красовський Г.Я., Радчук В.В. та ін. Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря. Монографія Під ред. С.О. Довгого – К.: Інформаційні технології, 2010. 260 с. Бібліогр. 91.

<https://old.nas.gov.ua/UA/Book/Pages/Default.aspx?BookID=0000005336>

<https://itgip.org/wp-content/uploads/2014/03/BookBlackSea.pdf>

62. Пащенко Р. Е., Радчук В. В., Красовський Г. Я. та ін. Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA. Монографія. Під ред. С. О. Довгого. – Київ. – 2013. – 296 с. <https://itgip.org/wp-content/uploads/2014/09/technologies-ecologic-monitoring.pdf>

63. Є.С. Анпілова, В.І. Клименко, Н.А. Новохацька, Д.Л. Крета. Використання геоінформаційних систем та дистанційного зондування з космосу для створення



картографічних моделей оцінки якості ґрунтів та поверхневих вод. Роль екологічної оцінки сільськогосподарських угідь у розвинених регіонах та в охороні екологічного балансу: Матеріали міжнародного семінару, 15 грудня 2015 р. – Баку, Азербайджан, 2015. – С. 59-61

[https://itgip.org/wp-content/uploads/2024/12/monohrafija\\_his\\_final.pdf](https://itgip.org/wp-content/uploads/2024/12/monohrafija_his_final.pdf)

64. Щипцов, О., Гордєєв, А., Лебідь, О., Охарєв, В., Теличко, Р., Федосєєнков, С., & Шундель, О. (2023). Інформаційні технології в задачах автоматизації моделювання та прогнозування гідрофізичної обстановки в акваторії Чорного моря. Екологічна безпека та природокористування, 45(1), 91–103 <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.1.91-103>

65. Лебідь, О., Охарєв, В., Федосєєнков, С., Шундель, О., Теличко, Р., & Клименков, О. (2023). Геоінформаційні технології екологічного моніторингу акваторії Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС. Екологічна безпека та природокористування, 48(4), 130–144.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.4.130-144>

66. А. Щипцов, Д.Л. Крета, О.Г. Лебідь, Н.А. Шевякіна. Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки // Екологічна безпека та природокористування. 36(4), с.66–76.

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>

67. Триснюк В. М., Марущак В.М. Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій. Науковий журнал: телекомунікаційні та інформаційні технології. № 4 (83). 2024р. С.80-88. ISSN 2412-4338. DOI:0.31673/2412-4338.2024.027280

<https://fileview.ukr.net/?url=https://mail.ukr.net/api/public/file>

68. Trofymchuk O. M., Shevyakina N.A., Klymenko V.I., Vyshnyakov V. Yu., Tomchenko O.V. Detection of thermal anomalies due to military actions in Ukraine using

remote sensing methods. XXII SGEM GeoConference 2022, July 2 - July 11, 2022. DOI:

[10.5593/sgem2022/2.1/s10.35](https://doi.org/10.5593/sgem2022/2.1/s10.35)

69. Vasyl Trysnyuk, Taras Trysnyuk, Anatolii Nikitin, Anatolii Kurylo, Olga Demydenko. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. ICSF 2021. E3S Web of Conferences 280, 09016 (2021).

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009016>

70. Kreta D.L. Use the geographic information systems and remote sensing from space for creation cartographic models for assessment of the quality of soils and surface water / Y.S.Anpilova, V.I.Klymenko, N.A.Novokhatska, D.L.Kreta // Role of environmental assessment of agricultural land in developed of regions and in protection of ecological balance: Materials international seminar, 15 December 2015. – Baku, Azerbaijan, 2015. – P. 59-61

71. Зайцев С. В. Методи та моделі забезпечення сталої достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних /Зайцев С. В. – Чернігів, 2016. – 397 с.



## ДОДАТКИ

## ДОДАТОК А

Довідка про впровадження результатів Командування Сил підтримки  
Збройних Сил України

Згідно з оригіналом

Начальник військ РХБ захисту –  
начальник управління РХБ захисту  
Командування Сил підтримки  
Збройних Сил України  
полковник

Євген НАГОРНИЙ

"\_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2025 року

### АКТ

впровадження наукових результатів дисертації  
аспіранта Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного  
простору Національної академії наук України  
ВОЛИНЦЯ Тараса Васильовича

Комісія управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України у складі голови комісії — полковника Артема ВЛАСЮКА та членів комісії: підполковника Антона ГОНЧАРА, підполковника Сергія КАРПІНСЬКОГО розглянула запропоновані матеріали в межах дисертаційного дослідження аспіранта Волинця Тараса Васильовича на тему “Інформаційні технології аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон”.

Комісією підтверджено, що реалізація поставленого наукового завдання сприяє суттєвому підвищенню достовірності результатів спостереження та значному розширенню функціональних можливостей інформаційно-аналітичних систем аерокосмічного моніторингу морських акваторій і прибережних територій. Це досягається завдяки впровадженню технологій інтеграції мобільних аерокосмічних платформ — зокрема безпілотних літальних апаратів і супутникових систем — для оперативного виявлення, локалізації та аналізу екологічно небезпечних ділянок. Застосування зазначених рішень дозволяє реалізовувати просторово-часову ідентифікацію зон ризику, що має критичне значення для своєчасного прийняття управлінських рішень у сфері охорони морського середовища та сталого природокористування.

Комісією встановлено, що поєднання даних дистанційного зондування Землі з інформацією, отриманою від фізико-хімічних сенсорів,

забезпечує формування гібридних моделей екологічного моніторингу, здатних з високою точністю прогнозувати екологічний стан морських акваторій. Такий підхід дозволяє формувати комплексну просторово-часову картину змін у морських екосистемах Чорного моря з урахуванням як природних процесів, так і антропогенних навантажень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні уніфікованої системи моделей та методів обробки інформації про забруднення морського середовища, яка враховує вплив воєнних дій, аварійних викидів, пошкоджень об'єктів критичної інфраструктури та апріорні знання про потенційно небезпечні осередки забруднення. Запропоноване рішення є основою для впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем екологічної безпеки морських територій.

Таким чином результати дисертаційного дослідження можуть бути реалізовані в ході бойової роботи управління РХБ захисту Командування Сил підтримки Збройних Сил України під час бойових операцій та ліквідації наслідків військових дій.

Голова комісії:

полковник



Артем ВЛАСЮК

Члени комісії:

підполковник



Антон ГОНЧАР

підполковник

Сергій КАРПІНСЬКИЙ

## ДОДАТОК Б

Довідка про впровадження результатів Розрахунково-аналітичного центру  
Збройних Сил України

Згідно з оригіналом

Начальник Розрахунково – аналітичного  
центру Збройних Сил України  
полковник Андрій ОЛЕФІР



## АКТ

впровадження наукових результатів дисертації  
аспіранта Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору  
Національної академії наук України  
ВОЛИНЦЯ Тараса Васильовича

Комісія Розрахунково-аналітичного центру Збройних Сил України у складі голови комісії — підполковника Руслана ШАТНОГО та членів комісії: майора Олександра ТРИКОВА капітана юстиції Дмитра СЕРГЄЄНКА розглянула запропоновані матеріали в межах дисертаційного дослідження аспіранта Волинця Тараса Васильовича на тему “Інформаційні технології аерокосмічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон”.

Комісією підтверджено, що реалізація поставленого наукового завдання сприяє суттєвому підвищенню достовірності результатів спостереження та значному розширенню функціональних можливостей інформаційно-аналітичних систем аерокосмічного моніторингу морських акваторій і прибережних територій. Це досягається завдяки впровадженню технологій інтеграції мобільних аерокосмічних платформ — зокрема безпілотних літальних апаратів і супутникових систем — для оперативного виявлення, локалізації та аналізу екологічно небезпечних ділянок. Застосування зазначених рішень дозволяє реалізовувати просторово-часову ідентифікацію зон ризику, що має критичне значення для своєчасного прийняття управлінських рішень у сфері охорони морського середовища та сталого природокористування.

Комісією встановлено, що поєднання даних дистанційного зондування Землі з інформацією, отриманою від фізико-хімічних сенсорів, забезпечує формування гібридних моделей екологічного моніторингу, здатних з високою



точністю прогнозувати екологічний стан морських акваторій. Такий підхід дозволяє формувати комплексну просторово-часову картину змін у морських екосистемах Чорного моря з урахуванням як природних процесів, так і антропогенних навантажень.

Практичне значення отриманих результатів полягає у створенні уніфікованої системи моделей та методів обробки інформації про забруднення морського середовища, яка враховує вплив воєнних дій, аварійних викидів, пошкоджень об'єктів критичної інфраструктури та апіорні знання про потенційно небезпечні осередки забруднення. Запропоноване рішення є основою для впровадження інтегрованих інформаційно-аналітичних систем екологічної безпеки морських територій.

Таким чином результати дисертаційного дослідження можуть бути реалізовані в ході бойової роботи Командування Сил підтримки Збройних Сил України під час бойових операцій та ліквідації наслідків військових дій.

Голова комісії:

підполковник

Руслан ШАТНИЙ

Члени комісії:

майор

Олександр ТРИКОВ

капітан юстиції

Дмитро СЕРГЄЄНКО