



Олександр
ТРОФИМЧУК
Василь
ТРИСНЮК
Тарас
ВОЛИНЕЦЬ
Вячеслав
ВИШНЯКОВ

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ
ТА АЕРОКОСМІЧНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
ДОСЛІДЖЕННЯ
МОРСЬКИХ
І ПРИБЕРЕЖНИХ
ЕКОСИСТЕМ**

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ НАН УКРАЇНИ

Олександр ТРОФИМЧУК
Василь ТРИСНЮК
Тарас ВОЛИНЕЦЬ
Вячеслав ВИШНЯКОВ

ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТА АЕРОКОСМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРСЬКИХ І ПРИБЕРЕЖНИХ ЕКОСИСТЕМ

ПРОЄКТ
«НАУКОВА КНИГА»

КИЇВ • АКАДЕМПЕРІОДИКА • 2026

Рецензенти:

Я.І. КОРНАГА, д-р техн. наук, декан факультету інформатики та обчислювальної техніки, проф. кафедри інформаційних систем та технологій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

В.В. ЖЕБКА, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри технологій цифрового розвитку Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій, м. Київ

Є.О. ЯКОВЛЄВ, д-р техн. наук, ст. наук. співроб., голов. наук. співроб. Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України

Рекомендовано Вченою радою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (протокол № 12 від 11 вересня 2025)

**Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми
«Трансформація науково-видавничого комплексу НАН України в умовах війни
і повоєнних змін у контексті впровадження європейських ініціатив
відкритої науки» (2026—2030)**

Трофимчук О.

T76 Геоінформаційні та аерокосмічні технології дослідження морських і прибережних екосистем / Олександр Трофимчук, Василь Триснюк, Тарас Волинець, Вячеслав Вишняков; НАН України; Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору. — Київ: Академперіодика, 2026. — 143 с.

ISBN 978-966-360-594-4

Проаналізовано теоретичні та прикладні засади інтеграції методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), геоінформаційних систем, штучного інтелекту та сенсорних мереж для вирішення завдань екологічної безпеки та управління природними ресурсами. Особливу увагу приділено алгоритмам автоматизованого дешифрування космічних і аерофотознімків, оцінці антропогенного навантаження, виявленню кризових ситуацій у морському середовищі, а також оптимізації обробки великих масивів даних ДЗЗ. Наведено результати прикладних досліджень стану Чорного та Азовського морів, прибережних територій України, що зазнали впливу воєнних дій та техногенних катастроф.

Для науковців, працівників природоохоронних та державних органів, студентів, аспірантів, докторантів.

УДК 528.9:004.9:551.46(477)

ISBN 978-966-360-594-4

© Інститут телекомунікацій і глобального
інформаційного простору НАН України, 2026
© Академперіодика, оформлення, 2026

ЗМІСТ

ВСТУП	5
-------------	---

РОЗДІЛ

1

СУЧАСНІ МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОБРОБКИ АЕРОКОСМІЧНИХ ДАНИХ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ І ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН

1.1. Інформаційне та нормативно-правове підґрунтя організації державної системи моніторингу морських вод України	7
1.2. Концептуальні засади формування та реалізації тематичних завдань супутникового моніторингу акваторії Чорного моря	16
1.3. Сучасні супутникові платформи та системи дистанційного моніторингу прибережних зон і морських акваторій. . .	19
1.4. Геоінформаційні технології екологічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон	22
1.5. Міжнародний досвід використання матеріалів космічних знімаль у завданнях моніторингу антропогенного забруднення морських акваторій	30
Висновок	33

РОЗДІЛ

2

ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ КОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ ТА ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН

2.1. Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних	36
2.2. Інформаційні технології в супутниковому моніторингу прибережних зон	44
2.3. Фізичні основи космічного моніторингу морських акваторій	50
2.4. Інформаційні технології обробки супутникових знімків	61
Висновок	66

РОЗДІЛ

3

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ
ТОЧНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО
РОЗПІЗНАВАННЯ ОБ'ЄКТІВ
НА АЕРОКОСМІЧНИХ ЗНІМКАХ**

3.1. Інформаційні технології для оцінки екологічного стану морських акваторій	69
3.2. Математична модель дешифрування аерофотознімків та автоматизація аналізу акваторій моря і прибережних зон	75
3.3. Моделювання антропогенних забруднень у акваторіях Чорного та Азовського морів за супутниковими знімками	89
3.4. Методика автоматизованого оконтурювання плям морських акваторій на цифрових супутникових знімках	96
3.5. Інструменти для побудови картографічних моделей плямистості акваторій Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС	99
Висновок	104

РОЗДІЛ

4

**УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ
ІНТЕГРОВАНОГО АЕРОКОСМІЧНОГО МОНІТОРИНГУ
МОРЬСЬКОГО СЕРЕДОВИЩА**

4.1. Розроблення програмного комплексу для тематичного аналізу супутникових знімків морських акваторій	106
4.2. Автоматизоване виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерокосмічними знімками	115
4.3. Розробка інструментів розпізнавання об'єктів та оптимізація обчислювальних ресурсів у завданнях супутникового моніторингу морських акваторій та прибережних зон	117
4.4. Геоінформаційне картографування заповідно-рекреаційних об'єктів	126
4.5. Оптимізація чинників техногенного навантаження на прибережні води	132
Висновок	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	137
УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ	142

На сучасному етапі розвитку цивілізації спостерігається стійке зростання потреби у надійних і науково обґрунтованих засобах спостереження за станом навколишнього природного середовища, зокрема морських акваторій і прибережних зон. Морські екосистеми та Світовий океан є ключовими елементами функціонування біосфери, оскільки вони беруть участь у регуляції кліматичних процесів, підтриманні біологічного різноманіття та формуванні ресурсного потенціалу для соціально-економічного розвитку. Водночас саме ці природні системи характеризуються підвищеною вразливістю до антропогенних чинників, як-от забруднення, інтенсивне використання природних ресурсів, техногенні аварії, воєнні впливи та результати глобальних кліматичних змін.

Для України, яка має узбережжя Чорного й Азовського морів, зазначені проблеми набувають особливої значущості та формують комплекс екологічних загроз, що потребують системного наукового осмислення й упровадження сучасних інформаційно-аналітичних підходів. Ситуація суттєво ускладнилася в умовах воєнних дій, унаслідок чого відбулись масштабні порушення природних і техногенних систем, пошкодження об'єктів критичної інфраструктури, забруднення морських акваторій і прибережних територій.

У цьому контексті визначальну роль відіграє застосування геоінформаційних систем, методів дистанційного зондування Землі та сучасних аерокосмічних технологій, що забезпечують можливість комплексного й оперативного моніторингу стану довкілля. Використання супутникових даних з високими показниками просторової, спектральної та часової роздільної здатності, а також інформації, отриманої за допомогою безпілотних літальних апаратів у поєднанні з алгоритмами штучного інтелекту, створює під-

ґрунтя для своєчасного виявлення екологічних загроз, аналізу та прогнозування змін у морських і прибережних екосистемах, а також формування ефективних моделей управління природоохоронною діяльністю.

Монографію «Геоінформаційні та аерокосмічні технології дослідження морських і прибережних екосистем» присвячено комплексному розгляду теоретичних засад і практичних напрямів інтегрованого екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон. У роботі систематизовано результати вітчизняних і зарубіжних наукових досліджень у галузі аналізу та інтерпретації аерокосмічних даних, просторово-часового моделювання природних процесів, формування геоінформаційних баз даних і розроблення інструментів підтримки управлінських рішень.

Особливу увагу зосереджено на проблематиці екологічної безпеки та охорони біорізноманіття морських екосистем. Розглянуто основні джерела й наслідки забруднення морського середовища, зокрема нафтові розливи, скиди промислових і побутових відходів, надходження токсичних речовин, а також проаналізовано вплив воєнних дій на стан прибережних територій і морських акваторій. Обґрунтовано доцільність інтеграції результатів екологічного моніторингу до національних і міжнародних систем управління довкіллям.

Суттєвим науково-практичним результатом дослідження стало вдосконалення підходів до автоматизованого дешифрування супутникових знімків та розроблення інтелектуальних алгоритмів класифікації морських об'єктів, ідентифікації зон забруднення та прогнозування розвитку кризових екологічних ситуацій. У роботі наведено приклади практичної реалізації запропонованих методів на акваторіях Чорного й Азовського морів із урахуванням багаторічних спостережень і сучасних екологічних викликів.

Колективне дослідження, виконане у 2021—2025 рр. під науковим керівництвом професорів О.М. Трофимчука та В.М. Триснюка за участю авторського колективу, пройшло апробацію на вітчизняних і міжнародних наукових заходах під егідою Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України.



РОЗДІЛ 1 СУЧАСНІ МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ДО ОБРОБКИ АЕРОКОСМІЧНИХ ДАНИХ ТА СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ МОРСЬКИХ АКВАТОРІЙ І ПРИБЕРЕЖНИХ ЗОН

У першому розділі здійснено системний огляд нормативно-правових засад, інституційного забезпечення та методичних підходів до формування і функціонування державної системи моніторингу водних ресурсів із пріоритетною увагою до морських акваторій і прибережних територій Чорноморського регіону. Проаналізовано типологію пунктів спостережень, основні види моніторингу (фоновий, загальний та кризовий), технічні аспекти вертикального зондування, номенклатуру контрольованих показників і речовин, а також визначено функціональні повноваження провідних державних інституцій у сфері екологічного контролю морського середовища.

Результати наукометричного та бібліографічного аналізу підтверджують, що використання аерокосмічних засобів спостереження посідає ключове місце в сучасних дослідженнях стану довкілля, зокрема в межах морських акваторій і прибережних зон. Поєднання даних дистанційного зондування з іншими інформаційно-аналітичними системами суттєво розширює можливості раціонального управління природними ресурсами, підвищення ефективності екологічного моніторингу та зміцнення екологічної безпеки.

1.1. Інформаційне та нормативно-правове підґрунтя організації державної системи моніторингу морських вод України

Технічні та інструментальні засоби спостереження за морськими акваторіями і прибережними територіями

Інструментальне забезпечення моніторингу морських акваторій і прибережних територій охоплює сукупність технічних, програмних та аналітичних засобів, призначених для систематичного спостереження, оцінювання та прогнозування змін стану морського середовища. В умовах України

застосування таких засобів є складовою державної системи екологічного моніторингу та здійснюється в межах чинного нормативно-правового поля, сформованого з урахуванням національних вимог і міжнародних екологічних стандартів.

Базові принципи організації екологічного моніторингу, зокрема контролю стану морських вод, закріплені в ¹. Цей нормативний акт визначає необхідність постійного спостереження за компонентами довкілля та акцентує увагу на впровадженні науково обґрунтованих методів досліджень і використанні сучасних технологічних рішень. Стратегічні орієнтири розвитку системи моніторингу також відображені в ², який визначає екологічну безпеку як одну з пріоритетних складових державної політики.

Окремі аспекти гігієнічного та хімічного контролю якості води, зокрема в межах рекреаційних зон, регламентуються ^{3, 4}, що встановлюють вимоги до оцінювання впливу забруднювальних речовин на довкілля і здоров'я населення [7—11].

У контексті євроінтеграційних процесів Україна поступово впроваджує положення Рамкової директиви Європейського Союзу щодо морської стратегії (2008/56/ЄС), яка орієнтована на досягнення та підтримання доброго екологічного статусу морських вод. Документ передбачає застосування інтегрованих інструментальних систем моніторингу з використанням найкращих доступних технологій, зокрема супутникових, автоматизованих і дистанційних методів спостережень, що дають змогу забезпечити комплексну оцінку стану морського середовища [1—3].

У практиці екологічного моніторингу морських акваторій в Україні та за кордоном використовують широкий спектр інструментальних засобів, які умовно можна згрупувати за характером отримання та масштабом просторових даних. Ключову роль серед них відіграють аерокосмічні, безпілотні та контактні сенсорні системи, а також стаціонарні засоби спостережень прибережної зони.

Провідне місце займають супутникові платформи дистанційного зондування Землі, зокрема супутникові місії серій *Sentinel* (*Sentinel-1*, *Sentinel-2*, *Sentinel-3*), *Landsat-8/9* та *MODIS* (місії *Terra/Aqua*). Вони забезпечують регу-

¹ Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text>

² Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року: Закон України від 28.02.2019 № 2697-VIII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>

³ Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>

⁴ Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення: Закон України від 24.02.1994 № 4004-XII. (Закон втратив чинність на підставі Закону № 2573-IX від 06.09.2022). <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text>

лярне отримання інформації про просторово-часову динаміку температурних полів, розвиток фітопланктону та цвітіння водоростей, поширення нафтових забруднень, трансформацію берегової лінії, зміну прозорості води та інших екологічно значущих параметрів. Оброблення й аналіз супутникових даних здійснюються із застосуванням спеціалізованих геоінформаційних і дистанційних програмних середовищ, зокрема *QGIS*, *ArcGIS*, *ENVI*, *SNAP (ESA)*, а також хмарних платформ типу *Google Earth Engine*.

Для детального дослідження локальних ділянок узбережжя та акваторій дедалі ширше застосовуються безпілотні літальні апарати, оснащені мультиспектральними або тепловізійними сенсорами. Такі системи дають змогу отримувати надвисоку просторову роздільну здатність — до кількох сантиметрів на піксель, що є критично важливим для виявлення процесів берегової ерозії, фіксації несанкціонованої забудови, локальних осередків забруднення чи замулення.

Важливим компонентом інструментального моніторингу є автономні гідрологічні сенсорні платформи, зокрема буї, оснащені комплексами датчиків солоності, температури, розчиненого кисню, показника *pH*, концентрації хлорофілу та турбідності, а також акустичними доплерівськими профілографами течій (*ADCP*). Такі системи здатні функціонувати в автоматичному режимі та передавати результати вимірювань у режимі реального часу за допомогою супутникових каналів зв'язку. До поширених технічних рішень належать платформи типу *SeaGuard*, *EMM (Enviro-Monitoring Modules)*, а ще прилади провідних виробників: *YSI*, *RBR*, *OTT*.

Окрему групу становлять стаціонарні берегові пункти спостережень, які обладнують метеорологічними станціями, системами автоматизованого відбору проб і приладами спектрофотометричного або лазерного аналізу. Вони забезпечують безперервний контроль показників якості води в зонах підвищеного антропогенного навантаження, зокрема в портових акваторіях, рекреаційних районах і місцях впадіння річок у море, відповідно до чинних нормативних і галузевих вимог.

Сучасні системи гідроакустичного зондування та батиметричних вимірювань використовують для детального вивчення морського й річкового дна, зокрема з метою просторової ідентифікації мулових відкладень, накопичень донного сміття, а також локалізації підводних осередків антропогенного забруднення. До складу таких технічних рішень належать ехолокаційні прилади, гідроакустичні сонарні комплекси та багатопроменеві сканувальні системи, зокрема ехолоти та бокові оглядові сонари. Їх функціонування у поєднанні з модулями супутникового позиціонування *GPS/GNSS* забезпечує високу просторову точність отриманих даних [4].

Програмно-інформаційне забезпечення управління екологічним моніторингом охоплює комплекс геоінформаційних платформ, призначених для централізованого зберігання, обробки, просторового аналізу та

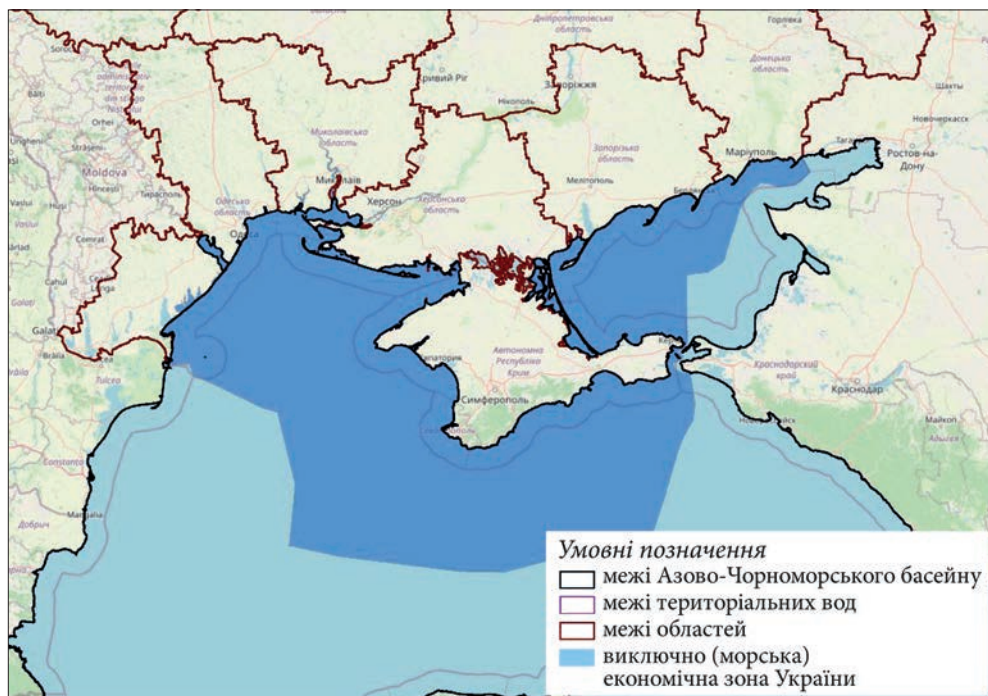


Рис. 1.1. Узагальнена картографічна схема морських акваторій та прилеглих прибережних територій

Джерело: складено автором за даними [50].

візуалізації екологічних даних. До найбільш поширених рішень належать ГІС-платформи та серверні технології, як-от *QGIS*, *ArcGIS Online*, *GeoServer*, у поєднанні з просторовими базами даних *PostgreSQL/PostGIS*. Водночас спостерігається активне впровадження хмароорієнтованих сервісів та платформ (*Google Earth Engine*, *Microsoft Azure*, *Amazon Web Services*), які забезпечують масштабоване паралельне оброблення значних обсягів супутникової інформації та спрощують інтеграцію з розподіленими сенсорними мережами екологічного спостереження.

В Україні паралельно впроваджується інтегрована автоматизована система екологічного моніторингу відповідно до положень Концепції розвитку системи моніторингу довкілля, затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України. Система орієнтована на цифровізацію процесів екологічного контролю, створення багаторівневої архітектури збору та аналізу даних, а також гармонізацію національних підходів із європейськими стандартами екологічного моніторингу ⁵.

⁵ Кабінет Міністрів України. (2017, 18 грудня). Концепція розвитку системи моніторингу довкілля в Україні (схвалено розпорядженням № 1020-р).

На міжнародному рівні Україна залучена до реалізації низки міждержавних ініціатив, зокрема *EMODnet* (*European Marine Observation and Data Network*) та *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (*CMEMS*), у межах яких застосовуються уніфіковані інструментальні засоби, стандартизовані методики збору даних і погоджені протоколи моніторингу морського середовища (рис. 1.1).

Ефективність інструментальних систем моніторингу морських акваторій зумовлена гармонійною взаємодією технічних засобів, правової інфраструктури, професійної кваліфікації кадрів та здатності обробляти великі обсяги екологічних даних. Впровадження такої інтегрованої системи дає змогу Україні виконувати міжнародні екологічні зобов'язання, швидко реагувати на потенційні екологічні загрози, що сприяє забезпеченню сталого розвитку Чорноморського регіону.

Наукометричний і бібліографічний аналіз джерел щодо використання аерокосмічного моніторингу в екологічних дослідженнях

Наукометричний і бібліографічний аналіз досліджень, присвячених аерокосмічному моніторингу морських акваторій та прибережних територій, є важливим аналітичним інструментом для системної оцінки розвитку відповідного наукового напрямку. Застосування такого підходу дає змогу простежити еволюцію наукових досліджень, інтенсивність публікаційної активності, просторову локалізацію провідних наукових центрів, домінуювальні тематичні напрями, застосовувані технологічні рішення, а також характер і структуру міжінституційних та міжнародних наукових партнерств. В умовах глобальних кліматичних змін, посилення антропогенного навантаження на прибережні зони та зростання актуальності концепцій сталого управління морськими ресурсами зазначений напрям наукових досліджень демонструє стабільну тенденцію до зростання інтересу з боку міжнародної наукової спільноти [5].

Аналіз інформаційних ресурсів провідних наукометричних баз даних *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, а також національних бібліографічних реєстрів, зокрема масиву наукових публікацій України, свідчить про суттєве збільшення кількості досліджень у сфері аерокосмічного моніторингу морських і прибережних акваторій у період з 2000 по 2024 рік. Зростання публікаційної активності в кілька разів відображає підвищення ролі методів дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем у вирішенні прикладних і фундаментальних завдань морської та прибережної екології [6—12]. Найбільша концентрація відповідних наукових робіт спостерігається у фахових міжнародних виданнях, зокрема *Remote Sensing*, *Marine Pollution Bulletin*, *International Journal of*

Remote Sensing, Ocean & Coastal Management, Environmental Monitoring and Assessment, а також у матеріалах профільних міжнародних конференцій і симпозіумів (IGARSS, SPIE, IEEE OCEANS).

Аналіз тематичної спрямованості наукових публікацій дає змогу виокремити кілька ключових дослідницьких напрямів. До них належать автоматизовані методи виявлення та ідентифікації морських забруднень (зокрема нафтових розливів, масового цвітіння фітопланктону та змін показників каламутності води); дослідження динаміки берегової лінії, ерозійних процесів і просторове моделювання зон підтоплення; оцінювання стану біологічного різноманіття та функціонування морських екосистем; супутникове картографування температурних полів і фізичних параметрів морської поверхні; а також впровадження методів штучного інтелекту, глибокого навчання та технологій аналізу великих даних у процесах обробки аерокосмічної інформації для морських регіонів.

Аналіз найцитованіших наукових публікацій свідчить, що значна частина досліджень зосереджена на розробленні та вдосконаленні алгоритмічних підходів до класифікації морських об'єктів і процесів за даними супутникових спостережень. У таких роботах широко використовуються матеріали місій *Sentinel-1* і *Sentinel-2*, а також дані сенсорів *MODIS* і супутників *Landsat 8—9*, що забезпечують багатоспектральне та радіолокаційне спостереження морських акваторій. Окремий науковий інтерес становлять дослідження, присвячені застосуванню даних синтетичної апертурної радіолокації (*SAR*), які дають змогу ефективно ідентифікувати нафтові забруднення незалежно від часу доби та метеорологічних умов, зокрема за наявності щільного хмарного покриття [7—10].

Паралельно простежується зростання кількості робіт, у яких для оброблення великих масивів аерокосмічної інформації застосовуються сучасні програмні та обчислювальні середовища, зокрема *Google Earth Engine*, *SNAP* (ESA), *QGIS* та *ArcGIS Pro*. Така тенденція відображає активне поширення хмарних обчислювальних технологій і відкритих інструментів аналізу просторових даних у сфері екологічного моніторингу морських і прибережних територій [11, 12].

У географічному аспекті лідерські позиції за показниками публікаційної активності посідають Сполучені Штати Америки, Китай, Італія, Франція, Німеччина та Іспанія. Водночас Україна демонструє поступове зростання наукового доробку в галузі аерокосмічного моніторингу морських акваторій, насамперед у межах досліджень Чорного й Азовського морів. Основний акцент вітчизняних наукових робіт спрямований на оцінювання екологічних ризиків, аналіз техногенного забруднення та дослідження впливу воєнних дій на стан прибережних екосистем. Серед провідних наукових установ і закладів вищої освіти, що здійснюють відповідні дослідження, доцільно назвати Інститут телекомунікацій і

глобального інформаційного простору НАН України, Інститут морської біології НАН України, факультет гідрометеорології і екології Одеського національного університету імені І.І. Мечникова, Державний науково-виробничий центр аерокосмічної інформації, дистанційного зондування Землі та моніторингу навколишнього середовища «Природа», що діє у спільному підпорядкуванні ДКА України і Міністерства екології та природних ресурсів України (нині Міністерство економіки, довкілля та сільського господарства України).

Результати бібліографічного аналізу також вказують на посилення мультидисциплінарного характеру сучасних досліджень, у межах яких поєднано підходи екології, гідрології, географії, інформаційних технологій, штучного інтелекту та інженерних наук. Значна частина публікацій характеризується високим рівнем міжнародного співавторства, що сприяє обміну даними, уніфікації технічних стандартів та проведенню спільного аналізу змін морських екосистем у глобальному масштабі [15—17].

За підсумками проведеного наукометричного та бібліографічного аналізу можна констатувати, що аерокосмічний моніторинг морських акваторій і прибережних зон є динамічною галуззю наукових досліджень, що інтенсивно розвивається. Вона активно інтегрує інноваційні інформаційні технології, зокрема методи штучного інтелекту, глибокого навчання, хмарні та паралельні обчислення. Подальше підвищення якості та прикладної цінності досліджень у цій сфері значною мірою залежить від розширення доступу до відкритих супутникових архівів, розвитку міжнародних програм обміну даними та системної державної підтримки наукових ініціатив у сфері екологічної безпеки морських територій.

У сучасному науковому та технічному контексті аерокосмічним технологіям належить ключова роль в екологічному моніторингу, зокрема у спостереженні за морськими акваторіями та прибережними зонами. Це зумовлено їхньою здатністю надавати оперативні, масштабовані та високоточні дані, що дають змогу вивчати стан навколишнього середовища на різних етапах його динаміки. Аналіз наукових публікацій свідчить про зростання інтересу до інтеграції аерокосмічних технологій з геоінформаційними системами (ГІС), спроможними створювати комплексні системи моніторингу, які не тільки відображають поточний стан екосистем, а й забезпечують можливість прогнозування їх змін. Такий підхід є надзвичайно важливим для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Визначальну роль у розвитку технологій супутникового моніторингу відіграла праця вчених Морського гідрофізичного інституту НАН України (нині під тимчасовою окупацією в м. Севастополь) — В. Єремєєва, Г. Коротаєва та Л. Радейкіної. Вони розробили систему моніторингу динаміки Чорного моря на основі супутникових технологій місії *TOPEX/Poseidon*, поєднуючи дані супутників із моделями загальної циркуляції моря. Отримані

результати підтвердили високу точність відтворення гідродинамічних процесів, що значно покращило розуміння динаміки морських екосистем [18].

Дослідження, проведене С. Щербаком, О. Лавровою, М. Митягіною, Т. Бочаровою, В. Кровотинцевим та О. Островським, було спрямоване на оцінювання стану поверхні Чорного моря за допомогою мультисенсорних супутникових даних. Підхід цих науковців передбачав аналіз спектральних характеристик водних мас та поєднання оптичних і радіолокаційних (SAR) сигналів для більш точного дослідження екосистем [19].

У рамках міжнародного проекту *EMBLAS*, який підтримали Європейська комісія та ПРООН, було реалізовано комплексний екологічний моніторинг Чорного моря згідно з вимогами Рамкової директиви ЄС. Цей проєкт передбачав розробку процедур збору даних, систем їх обробки та інтерпретації, що стало основою для ухвалення управлінських рішень у сфері екологічної безпеки [20].

Важливий внесок у наукові дослідження зробив Віктор Єгоров — академік НАН України (до 2022 року), фахівець у галузі радіоекології морів. Він здійснив низку фундаментальних досліджень щодо метанових газових викидів з дна Чорного моря, а також міграції радіонуклідів після Чорнобильської катастрофи. Його праці й монографії стали основою для розробки методик оцінювання екологічного стану акваторій України, зокрема щодо нормування антропогенного забруднення водойм за допомогою біогеохімічних критеріїв [21].

Цікавим прикладом є дослідження, яке представили на міжнародній конференції в квітні 2025 року науковці Київського національного університету імені Тараса Шевченка — Богдан Цибенко, Тетяна Малик і Дмитро Ляшенко. Вони здійснили детальний аналіз супутникових даних місії *Sentinel-1* для виявлення вуглеводневого забруднення в Чорному та Азовському морях, зокрема провели моделювання наслідків аварійного скиду нафтопродуктів поблизу Керченської протоки в грудні 2024 року [5, 6]. Окрім того, міжнародні дослідження також містять цікавий приклад використання комбінованих моделей, які поєднують оптичні дані та вимірювання *in situ* для аналізу стану узбережжя Чорного моря в Болгарії. Результати показали, що застосування гібридного підходу значно збагачує аналітичну інформацію щодо стану прибережних екосистем [22].

Ці роботи стають основою для подальшого розвитку наукових досліджень, адже моніторинг морських середовищ набуває статусу міждисциплінарної практики, яка інтегрує геоінформаційні системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), моделі циркуляції, гідрохімію та екологічні сенсори. В Україні цей напрям активно розвивається, зокрема завдяки проведенню експедиційних спостережень («Чорне море — 2019»), а також розширенню наукового флоту дослідницьких суден, а саме через залучення судна «Борис Александров» [23].

Законодавчі засади та організація державного моніторингу морських вод України

Законодавче та нормативно-правове регулювання державного моніторингу морських вод України базується на положеннях Водного кодексу України, Закону України «Про охорону навколишнього природного середовища», а також на підзаконних нормативних актах Кабінету Міністрів України, що визначають організаційні та процедурні засади здійснення екологічного моніторингу водних об'єктів, зокрема й морських акваторій. Згідно зі статтею 21 Водного кодексу України, державний моніторинг вод розглядається як складова загальнодержавної системи моніторингу довкілля та спрямований на систематичний збір, накопичення, оброблення й аналіз інформації про стан водного середовища з метою обґрунтування управлінських рішень у сфері охорони, раціонального використання та відтворення водних ресурсів.

Визначальним нормативним документом у цій сфері є⁶, чим затверджено Порядок здійснення державного моніторингу вод. Зазначений документ конкретизує організаційні, технічні та методичні основи функціонування системи моніторингу, встановлює перелік об'єктів спостереження, визначає потенційні джерела забруднення, методи отримання первинних даних і процедури їх оцінювання. Відповідно до положень Порядку, система моніторингу охоплює не лише внутрішні морські води та територіальне море України, але й морські акваторії в межах виключної (морської) економічної зони [3—5].

Організаційна модель державного моніторингу морських вод передбачає формування ієрархічної мережі пунктів спостереження, які умовно поділяються на три основні групи. До першої належать пункти берегового контролю, що розміщуються у зонах рекреаційного використання, поблизу морських портів, у гирлових ділянках річок, районах скиду стічних вод та на територіях інтенсивної господарської діяльності, зокрема видобутку корисних копалин. Друга група включає сезонні та довгострокові пункти відкритого моря, призначені для дослідження просторово-часової, сезонної та міжрічної динаміки забруднення морського середовища. Третю групу становлять кризові пункти екологічного ризику, які оперативно формуються у разі виникнення надзвичайних ситуацій, техногенних аварій або фіксації фактів значного забруднення, що потребують негайного реагування та посиленого контролю.

Реалізація державного моніторингу морських вод здійснюється за участю центральних органів виконавчої влади, до повноважень яких на-

⁶ Про затвердження Порядку здійснення державного моніторингу вод: постанова Кабінету Міністрів України від 19.09.2018 № 758. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/758-2018-%D0%BF#Text>

лежать питання охорони та раціонального використання водних ресурсів. Ключову роль у цьому процесі відіграють Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, Державне агентство водних ресурсів України та Державна екологічна інспекція України, а також мережа науково-дослідних установ і регіональних лабораторій, що спеціалізуються на контролі стану водного середовища. У межах виконання функцій державного нагляду та екологічного контролю зазначені структури здійснюють відбирання проб і проводять комплекс хімічних, фізико-хімічних, біологічних та гідрологічних вимірювань із урахуванням системи класифікації показників якості вод, гармонізованої з положеннями Водної рамкової директиви Європейського Союзу 2000/60/ЄС.

Чинна нормативно-правова база також відображає впровадження сучасних технологічних підходів до здійснення моніторингу морського середовища. Зокрема, на нормативному рівні передбачено використання технологій дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, супутникових спостережень, а також автоматизованих засобів збору інформації з морських платформ, дрейфових і стаціонарних буїв та сенсорних мереж, побудованих на основі концепції Інтернету речей (*Internet of Things, IoT*). У контексті євроінтеграційних процесів відбувається поступова гармонізація національної системи моніторингу з вимогами *Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS)* та рекомендаціями Європейського агентства з навколишнього середовища (EEA), що сприяє підвищенню порівнянності та сумісності отриманих даних на міжнародному рівні.

Загалом законодавчі та організаційні засади державного моніторингу морських вод України формують цілісну систему регуляторних та інституційних механізмів, спрямованих на забезпечення екологічної безпеки морських акваторій. У поєднанні з інноваційними засобами спостереження такі механізми створюють передумови для своєчасного виявлення екологічних загроз, аналізу динаміки антропогенного навантаження та розроблення ефективних заходів з охорони й відновлення морського середовища.

1.2. Концептуальні засади формування та реалізації тематичних завдань супутникового моніторингу акваторії Чорного моря

Екосистеми прибережних територій характеризуються підвищеною чутливістю до впливу як антропогенних, так і природних чинників, що зумовлює необхідність постійного та науково обґрунтованого спостереження за ними. Ефективне управління процесами сталого розвитку узбережжя та морських акваторій потребує структурованої багаторівневої інформа-

ції про просторово-часову динаміку соціально-економічних, екологічних і природних процесів, які формують стан цих територій. Досягнення у сфері космічних досліджень створили принципово нові можливості для комплексного аналізу взаємодії ключових компонентів природного середовища — суходолу, океану та атмосфери — шляхом використання супутникових технологій, що забезпечують не лише моніторинг і оцінювання поточного стану, але й прогнозування змін під впливом зовнішніх факторів [24].

Технології дистанційного зондування Землі орбітального базування дозволяють отримувати інформацію глобального та регіонального масштабу з високою просторовою і часовою роздільною здатністю. Моніторинг гідросфери Землі здійснюється завдяки використанню електромагнітного випромінювання засобами ДЗЗ, які утворюються за рахунок внутрішніх теплових процесів (інфрачервоний і мікрохвильовий діапазон спектра) або за рахунок відбивання опромінювання зовнішніх джерел природного й штучного походження (ультрафіолетовий, видимий, ближній інфрачервоний та радіолокаційний діапазони). Це дає змогу визначати якісний стан води та наявність на ній криги або будь яких забруднень. Супутникові знімки містять дані про фізичні, хімічні, біологічні та морфометричні характеристики об'єктів спостереження, інтерпретація яких ґрунтується на встановленні закономірних залежностей між параметрами електромагнітного випромінювання та властивостями природного середовища.

Останніми роками відзначається інтенсивний розвиток аерокосмічних технологій, орієнтованих на дослідження стану морських вод, що зумовлено зростанням їх прикладної значущості для завдань екологічної безпеки. Основу глобальної супутникової системи моніторингу клімату Землі складають низьковисотні космічні апарати детального вивчення глобальних кліматичних змін Землі *TERRA* й *AQUA* за програмою *EOS* (англ. Earth Observing System — Система спостереження Землі) та двоярусне угруповання оперативних штучних супутників Землі метеорологічного спостереження — полярно-орбітальні (висота 600—1500 км) та геостационарні (висота над поверхнею Землі $\approx$ 36 тис. км).

На борту космічних апаратів *TERRA* й *AQUA* встановлено по п'ять оптико-електронних знімальних систем ДЗЗ, із яких найбільш інформативним є гіперспектральний 36-канальний сканер *MODIS*.

Практична цінність сучасних супутникових сенсорів полягає у здатності реєструвати широкий спектр екологічно значущих параметрів морського середовища. До таких параметрів належать, зокрема, оптико-гідрологічні характеристики, зміна яких пов'язана з варіаціями коефіцієнтів поглинання та розсіювання світла у воді внаслідок коливань концентрації завислих речовин або наявності поверхневих плівок, зокрема нафтового походження. Важливу роль відіграє також фіксація темпе-

ратурних характеристик водної товщі, особливо в районах апвелінгу, внутрішніх хвиль, морських течій і зон турбулентного перемішування. Окрім цього, супутникові методи дають змогу опосередковано оцінювати електропровідність води, що є ключовим показником рівня її солоності та стратифікації.

Показовим прикладом практичного застосування супутникових технологій є формування карт просторового розподілу концентрації хлорофілу та температури морської поверхні для акваторій Чорного й Азовського морів. Такі картографічні продукти отримують на основі оброблення даних з відкритих супутників: *TERRA/AQUA* (п.р. 250/500/1000м.); *NPP-Suomi* (п.р. 325/750 м.); *NOAA-20* (п.р. 325,750м), *Sentinel-1* (РБО п.р. 10 × 20 м.) та *Sentinel-2* (ОЕА п.р. 10 м.). Аналіз супутникових зображень дає змогу візуально та аналітично ідентифікувати ділянки з підвищеним вмістом речовин теригенного походження, а також виявляти ознаки нафтового забруднення морської поверхні [25—26].

Досвід використання супутникового моніторингу як в Україні, так і в міжнародній практиці підтверджує його високу ефективність для вирішення широкого спектра прикладних і наукових завдань. Зокрема, за допомогою аерокосмічних даних здійснюється детальне картування мілководних ділянок і вивчення морфологічних особливостей поверхні моря, оцінювання швидкості та напрямків морських течій і перенесення водних мас уздовж берегової лінії, визначення температурних характеристик поверхневого шару води, а також аналіз параметрів хвильових процесів, включно з висотою хвиль і напрямком їх поширення. Важливе значення має фіксація коливань рівня моря, спостереження за просторовими змінами солоності, екологічний моніторинг прибережних зон, що перебувають під впливом промислових об'єктів, і виявлення локальних осередків забруднення, як-от аварійні скиди або розливи, з подальшим визначенням їх джерел і моделюванням поширення. Крім того, супутникові методи широко застосовуються для виявлення нафтових забруднень, моделювання просторово-часової динаміки фітопланктону та ідентифікації фактів несанкціонованої забудови у водоохоронних зонах і гирлах річок.

Реалізація зазначених завдань забезпечує органи державного моніторингу та користувачів морських ресурсів достовірною й актуальною інформацією про стан акваторій України в межах територіального моря, континентального шельфу та виняткової (морської) економічної зони. Отримані дані мають істотне практичне значення для обґрунтування раціонального використання морських ресурсів із дотриманням екологічних нормативів, контролю виконання встановлених квот і гранично допустимих норм скидів забруднювальних речовин, а також для здійснення екологічного нагляду під час поводження з токсичними, небезпеч-

ними та радіоактивними речовинами на всіх етапах їх транспортування, зберігання та утилізації.

Крім цього, результати супутникового моніторингу використовують для екологічного супроводу планування, будівництва та експлуатації промислових і інфраструктурних об'єктів, контролю операцій з відходами, спостереження за процесами видобування природних ресурсів, включно з буровими, вибуховими та днопоглиблювальними роботами, а ще для запобігання виснаженню біоресурсів і зниженню біорізноманіття. Вони відіграють важливу роль у забезпеченні дотримання вимог екологічної безпеки під час виконання науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт, реалізації інфраструктурних проектів та впровадження нових технологічних рішень.

Окремо слід зазначити, що результати тематичного дешифрування супутникових знімків можуть бути використані для оцінювання екологічних збитків у разі порушень природоохоронного законодавства, розроблення планів з ліквідації негативних наслідків забруднення, моніторингу міграції забруднювальних агентів і контролю ефективності природоохоронних заходів. Вони також слугують інформаційною основою для проведення екологічної експертизи проектної документації на об'єкти портової інфраструктури, зокрема під час виконання днопоглиблювальних робіт і організації поводження з відходами.

1.3. Сучасні супутникові платформи та системи дистанційного моніторингу прибережних зон і морських акваторій

Екосистема супутникового моніторингу морських акваторій

Ефективне здійснення моніторингу прибережних територій і морських акваторій у сучасних умовах є неможливим без залучення супутникових технологій, які забезпечують систематичне, багатопараметричне спостереження за об'єктами зі значною просторовою протяжністю [25]. Космічні апарати дистанційного зондування Землі є базовим джерелом високоточних і репрезентативних даних для функціонування систем екологічного моніторингу, оскільки спроможні охоплювати великі площі з необхідною періодичністю спостережень (табл. 1.1).

Сучасні супутникові платформи забезпечують отримання інформації в широкому спектральному діапазоні, включно з видимим і ближнім інфрачервоним (VNIR), короткохвильовим інфрачервоним (SWIR), тепловим інфрачервоним (TIR), а також у радіолокаційному діапазоні. Просторова роздільна здатність цих даних варіюється від надвисокої (менше 1 м) до

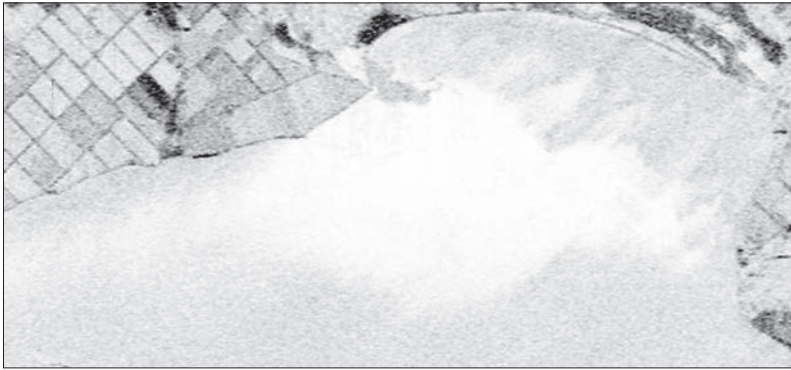


Рис. 1.2. Приклад вихідного супутникового знімка, використаного для аналізу стану прибережної зони та морської акваторії
Джерело: наведено за [48].

середньої та низької (порядку 500—1000 м), що створює передумови для комплексного аналізу широкого кола природних і техногенних процесів, характерних для прибережних зон та морських регіонів. Поєднання багатоспектральних і радіолокаційних спостережень дає змогу отримувати цілісне уявлення про стан морського середовища незалежно від погодних умов і часу доби (рис. 1.2).

Таблиця 1.1. Основні характеристики знімальної апаратури систем космічного базування

Знімальна система	Спектральний діапазон, мкм	Просторова розрізненість, м	Смуга огляду, км
<i>QuickBird</i>	0,45—0,9	0,6/2,4	16,5
<i>SPOT-5</i>	0,5—1,7	1/3	28
<i>ETM+/Landast</i> ¹	0,45—12,5	15/30/60	185
<i>ASTER/Terra</i> ³	0,5—11,7	15/30/90	60
<i>AWiFS/IRS-P6</i>	0,52—1,7	56	740
<i>MODIS/TRRA-AQUA</i> ⁴	0,5—14,4	250/1000	2230
<i>AVHRR/NOAA</i> ⁴	0,6—12,5	1100	2600
<i>VIIRS/NPP-NOAA</i> ⁴			
<i>Sentinel-1</i> ⁵		10—25	80
<i>Sentinel-2</i> ²		10—60	290

¹ Довгостроковий моніторинг, екологічні дослідження; ² моніторинг рослинності, водних ресурсів; ³ геологічні дослідження, виявлення теплових аномалій; ⁴ глобальний моніторинг, кліматичні дослідження; ⁵ моніторинг забруднення водної поверхні та виявлення поверхнево-активних речовин (ПАР).

Джерело: складено за [14, 48].

Візуалізація траєкторій супутників та планування знімання

Важливе місце в структурі сучасних інформаційних технологій супутникового моніторингу посідають сервіси прогнозування орбітального положення космічних апаратів і планування знімальних сеансів. Інтерактивні програмні платформи, зокрема *ESA Orbit Viewer* та програмне середовище *Orbitron*, забезпечують можливість оперативного відстеження орбіт супутників у реальному часі, моделювання траєкторій їхнього руху, задання координат цільових ділянок спостереження та попереднього планування знімання. Визначення точного часу прольоту супутника над заданим регіоном є критично важливим для оптимізації процесу замовлення знімків і його інтеграції в загальну інформаційно-аналітичну систему екологічного моніторингу [39].

Застосування сучасних інформаційних технологій із використанням супутникових даних суттєво розширює функціональні можливості систем моніторингу морських і прибережних акваторій. Такі технології дають змогу автоматизувати формування розкладів супутникової зйомки в межах геоінформаційних систем, інтегрувати отримані зображення у комплексні моделі оцінювання екологічного стану водних об'єктів, а ще впроваджувати алгоритми штучного інтелекту для автоматизованого розпізнавання природних і техногенних об'єктів. Це охоплює ідентифікацію змін берегової лінії, виявлення розливів нафтопродуктів та зон евтрофікації, а також інших ознак деградації морських і прибережних екосистем.



Рис. 1.3. Векторизоване представлення фрагмента супутникового знімка прибережної зони

Джерело: розроблено за матеріалами [22].

1.4. Геоінформаційні технології екологічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон

Дослідження у сфері екологічної безпеки з використанням інформаційних технологій

Геоінформаційні технології (ГІТ) посідають провідне місце в сучасних системах екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон України в межах Чорного та Азовського морів. Їх використання забезпечує оперативне отримання, інтеграцію та аналітичну обробку значних обсягів просторово-часових даних, що є критично важливим для оцінювання екологічного стану морського середовища, виявлення осередків забруднення, прогнозування розвитку надзвичайних ситуацій та підтримки процесів ухвалення управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.

Сучасні системи моніторингу ґрунтуються на комплексній інтеграції даних дистанційного зондування Землі, отриманих із супутникових платформ, безпілотних літальних апаратів та наземних пунктів спостереження [39]. Зокрема, використання супутників серії *Sentinel* програми *Copernicus* забезпечує регулярне надходження багатоспектральних знімків із високою просторовою роздільною здатністю, які є інформаційною основою для виявлення змін у морських екосистемах, насамперед процесів евтрофікації, цвітіння водоростей, нафтових розливів та інших форм антропогенного впливу.

Геоінформаційні технології дають змогу формувати інтерактивні картографічні та аналітичні моделі, що відображають просторовий розподіл природних і техногенних об'єктів, а також взаємозв'язки між ними на основі багатoshарових баз даних. Такі моделі можуть включати не лише екологічні показники, а й техніко-економічні характеристики об'єктів господарської діяльності, що створює наукове підґрунтя для планування природоохоронних заходів і оптимізації використання морських ресурсів.

Використання безпілотних літальних апаратів у поєднанні з геоінформаційними технологіями істотно підвищує ефективність моніторингу прибережних територій. БПЛА забезпечують отримання високоточних даних із надвисокою просторовою деталізацією, що дає змогу оперативно фіксувати локальні зміни стану узбережжя та своєчасно реагувати на потенційні екологічні загрози. У наукових дослідженнях запропоновано методи та технології створення комплексних систем моніторингу морських акваторій і прибережних зон із використанням БПЛА, спрямовані на підвищення точності, оперативності та ефективності процесів збору екологічної інформації [27].

Важливою складовою зазначених підходів є застосування геоінформаційних систем для інтеграції, оброблення та аналітичної інтерпретації різномірних даних. ГІС-технології забезпечують створення тематичних карт, просторових моделей і сценаріїв розвитку екологічної ситуації, що є

основою для ухвалення обґрунтованих управлінських рішень у сфері охорони морського середовища.

Загалом упровадження геоінформаційних та інформаційних технологій у систему екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон України сприяє підвищенню ефективності спостережень, своєчасному виявленню та локалізації екологічних загроз, а також формує науково обґрунтовану базу для управління природними ресурсами. Інформаційні технології є невід'ємним компонентом аерокосмічного моніторингу, оскільки забезпечують повний цикл роботи з даними — від збору до аналітичної інтерпретації та підтримки ухвалення рішень. Українські наукові установи активно інтегрують сучасні інформаційні рішення в практику екологічного моніторингу, що сприяє підвищенню рівня екологічної безпеки та ефективності природоохоронної діяльності.

В умовах повномасштабної збройної агресії, що триває з 2022 року, проблематика екологічної безпеки морських акваторій України набула особливої гостроти. Територіальні води Чорного та Азовського морів, які й до цього зазнавали значного антропогенного навантаження, опинилися під впливом нових, безпрецедентних загроз, пов'язаних із воєнними діями [41]. До традиційних джерел забруднення — промислових і комунальних скидів, діяльності морського транспорту та агропромислового комплексу — додалися наслідки обстрілів критичної інфраструктури, руйнування гідротехнічних споруд, порушення функціонування очисних систем, пошкодження хімічних складів і нафтобаз.

Після початку повномасштабної війни різко зросла кількість локальних осередків екологічної небезпеки, зумовлених вибухами, аваріями на прибережних промислових об'єктах і неконтрольованими скиданнями забруднених вод. Особливо загрозливою є ситуація в прифронтових містах, зокрема в Миколаєві, Очакові та Скадовську, де руйнування каналізаційних мереж призвело до скидання неочищених або частково очищених стічних вод безпосередньо у прибережні акваторії. Окрім цього, воєнні дії супроводжуються надходженням у морське середовище вибухонебезпечних речовин, пального, важких металів і мікропластику, утворених унаслідок руйнування боєприпасів і військової техніки, створюючи довготривалі ризики для морських екосистем.

Формування фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Чорного моря

Створення цілісного та репрезентативного фонду космічних знімків є базовою умовою для проведення системних досліджень стану територіальних вод Чорного моря із застосуванням геоінформаційних та аерокосмічних технологій. Такий фонд забезпечує накопичення, впоряд-

кування і довготривале зберігання супутникових даних, необхідних для аналізу просторово-часової динаміки екологічних процесів, оцінювання антропогенного впливу та виявлення довгострокових тенденцій змін морського середовища.

Космічні апарати, що використовують для задач екологічного моніторингу, можуть бути умовно класифіковані за кількома ключовими ознаками. Однією з основних є спектральна чутливість сенсорів, відповідно до якої виділяють оптичні та радіолокаційні супутникові системи. За типом зйомки розрізняють панхроматичні, мультиспектральні та гіперспектральні платформи, кожна з яких орієнтована на вирішення специфічних аналітичних завдань. Важливою класифікаційною ознакою є також просторова роздільна здатність даних, що поділяється на високу, середню та низьку, і визначає можливості деталізації об'єктів спостереження.

Практичне значення для досліджень морських акваторій має, зокрема, супутник *Landsat-8*, оснащений тепловим інфрачервоним сенсором *TIRS*, який забезпечує отримання інформації в інфрачервоному діапазоні та використовується для аналізу температури поверхні моря. Такі дані є важливими для дослідження теплових аномалій, зон апвелінгу та інших гідрофізичних процесів. Водночас супутники *Sentinel-1A/B*, обладнані радаром із синтетичною апертурою, забезпечують отримання SAR-знімків, що дає змогу здійснювати моніторинг морських акваторій незалежно від метеорологічних умов і рівня освітленості, зокрема в нічний час або за суцільної хмарності (табл. 1.2).

Комплексне використання оптичних і радіолокаційних супутникових даних у межах єдиного фонду космічних знімків створює передумови для підвищення надійності та повноти екологічного аналізу територіальних

Таблиця 1.2. Порівняльна характеристика супутникових платформ, що застосовуються для екологічного моніторингу морських акваторій

Супутник	Роздільна здатність, м	Спектр	Повторення, днів	Особливості
<i>Landsat-8</i>	15—100	VNIR, SWIR, TIR	16	Відкритий доступ, архів з 1972 р.
<i>Sentinel-2</i>	10—60	VNIR, SWIR	5	Безкоштовно, високочастотна зйомка
<i>WorldView-3</i>	0,31—1,24	PAN, VNIR, SWIR	<1	Комерційний, надвисока роздільність
<i>Sentinel-1</i>	10	SAR (C-band)	6	Незалежний від погодних умов

Джерело: складено за [14, 48].

вод Чорного моря. Такий підхід забезпечує багатокритеріальну оцінку стану морського середовища, поєднуючи інформацію про оптичні, термічні та структурні характеристики водної поверхні.

Формування фонду космічних знімків для дослідження територіальних вод Азовського моря

Супутникові знімки, отримані з платформ NOAA за допомогою радіометра AVHRR, забезпечують можливість оперативного, зокрема щоденного, моніторингу льодової обстановки та змін снігового покриву, а також дають змогу своєчасно ідентифікувати зони інтенсивного розвитку фітопланктону. Завдяки високій повторюваності знімання ці дані є особливо цінними для аналізу короткострокової динаміки процесів у мілководних морських акваторіях. Водночас знімки, отримані з супутника TERRA за допомогою інструмента MODIS, охоплюють розширений набір спектральних каналів, що дає змогу виконувати детальний температурний аналіз поверхневого шару води, виявляти теплові аномалії, гарячі та холодні течії, просторовий розподіл забруднювальних домішок і особливості температурної стратифікації водної товщі.

Супутникові системи SPOT і Landsat забезпечують просторову роздільну здатність у межах 10—30 м, що створює передумови для дослідження забруднення прибережних вод стічними скидами, аналізу функціонування портової інфраструктури та оцінювання змін берегової лінії [28]. Для розв'язання завдань високодетального аналізу використовуються знімки з супутника QuickBird, які характеризуються надвисокою просторовою деталізацією (до 0,61 м) і застосовуються для локалізації точкових джерел забруднення, ідентифікації несанкціонованих скидів та виявлення локальних техногенних впливів на водне середовище.

Формування фонду космічних знімків здійснюється з урахуванням інформаційно-аналітичної моделі просторових даних, що передбачає їх систематизацію, геоприв'язку та подальшу інтеграцію в геоінформаційні середовища. Візуалізація супутникових матеріалів реалізується з використанням ГІС-платформ, зокрема ArcGIS і QGIS, у межах яких кожен знімок відображається у вигляді растрового шару з можливістю накладання додаткових аналітичних картограм. Такі картографічні представлення, наприклад, картограми покриття акваторії Азовського моря знімками NOAA, TERRA або SPOT, дають змогу оперативно визначати часові інтервали спостережень, оцінювати повторюваність охоплення та аналізувати зміни спектральних характеристик досліджуваних об'єктів у часі (табл. 1.3).

Для розуміння можливості та періодичності отримання знімків для використання основними технічними параметрами є: площа зйомки; період зйомки; кількість апаратів в системі; час на виконання замовлення.

1. Площа зйомки:

Для *SuperView-1* мінімальний розмір одиночної зйомки складає 12×12 км (144 км^2), площинної зйомки — від 8 знімків (від 1152 км^2).

Для *EROS-B* - мінімальний розмір одиночної зйомки 7×7 км (49 км^2), площинної зйомки — від 2 знімків (від 98 км^2).

Для *Cic-2-1* — мінімальний розмір одиночної зйомки — $46,6 \times 46,6$ км (2170 км^2).

Для *Sentinel-1* — ширина зйомки 250 км.

Для *Sentinel-2* – ширина зйомки 290 км.

2. Час виконання заявки на зйомку:

Для *SuperView-1* стандартне замовлення за сприятливих погодних умов виконується протягом 72 годин, пріоритетне замовлення — протягом 48 годин, екстрене замовлення — протягом 24 годин.

Для *EROS-B* стандартне замовлення складає 1—3 доби (із врахуванням хмарності й точки знаходження супутника на момент замовлення), екстрене замовлення — до 24 годин (без врахування хмарності, за наявності витка над зоною зацікавлення).

Для *Sentinel-1, 2* — періодичність знімання 10 діб для одного апарату та 5 діб для двох.

По тексту наведено приклад візуалізації просторового покриття акваторії Азовського моря супутниковими знімками *Landsat* за період 2019—2023 років, що ілюструє можливості просторово-часового аналізу доступних аерокосмічних даних (рис. 1.4—1.6).

Під час формування архіву супутникових даних враховується не лише просторове покриття акваторії, а й повнота спектральної інформації, що міститься у знімках. Для оцінювання якості водного середовища, концентрації домішок, розвитку фітопланктону та наявності нафтопродуктів широко застосовуються спектральні індекси, зокрема *NDVI*, *NDWI*, *NDCI*, *FAI* та інші. Використання сучасних інформаційних технологій дає змогу не тільки ідентифікувати просторові аномалії, але й кількісно оці-

Таблиця 1.3. Фонд космічних знімків, використаних для дослідження територіальних вод Азовського моря

Космічний апарат	Кількість знімків	Тип носія / Директорій
<i>NOAA</i>	4	Диск № 1, директорій <i>NOAA</i>
<i>TERRA</i>	5	Диск № 1, директорій <i>TERRA</i>
<i>SPOT</i>	6	Диск № 1, директорій <i>SPOT</i>
<i>LANDSAT</i>	9	Диск № 1, директорій <i>LANDSAT</i>
<i>QuickBird</i>	5	Диск № 1, директорій <i>QuickBird</i>

Джерело: складено за [23].



Рис. 1.4. Супутниковий знімок акваторії Азовського моря, отриманий із платформи NOAA-17
Джерело: за [47].

нювати їх площі, визначати середні спектральні характеристики, а також аналізувати динаміку змін у багаторічному розрізі (рис. 1.7).

Сформований фонд космічних знімків слугує інформаційною основою для виконання прогностичного аналізу екологічних процесів. Застосування методів аналізу часових рядів спроможне прогнозувати просторове поширення плям забруднення, інтенсивність і тривалість цвітіння вод, а також зміну температури поверхневого шару моря. Такі прогнози мають особливе значення для забезпечення сталого розвитку рибного господарства, безпеки морської навігації, рекреаційної діяльності та загальної екологічної безпеки регіону (рис. 1.8).

Подані графічні матеріали відображають основні техніко-експлуатаційні характеристики супутникових систем, використовуваних для екологічного моніторингу акваторії Азовського моря, зокрема просторову роздільну здатність, періодичність знімання, спектральні можливості сенсорів та рівень їх придатності для виконання різних аналітичних завдань екологічного спрямування.

Найвищий рівень просторової деталізації забезпечує супутник *QuickBird* із роздільною здатністю до 0,61 м, що робить його особливо ефективним інструментом для високоточного картографування прибережних територій, виявлення локальних джерел забруднення та аналізу дрібномасштабних змін берегової зони. Натомість супутникові дані сис-

Картограма покриття знімками NOAA території України

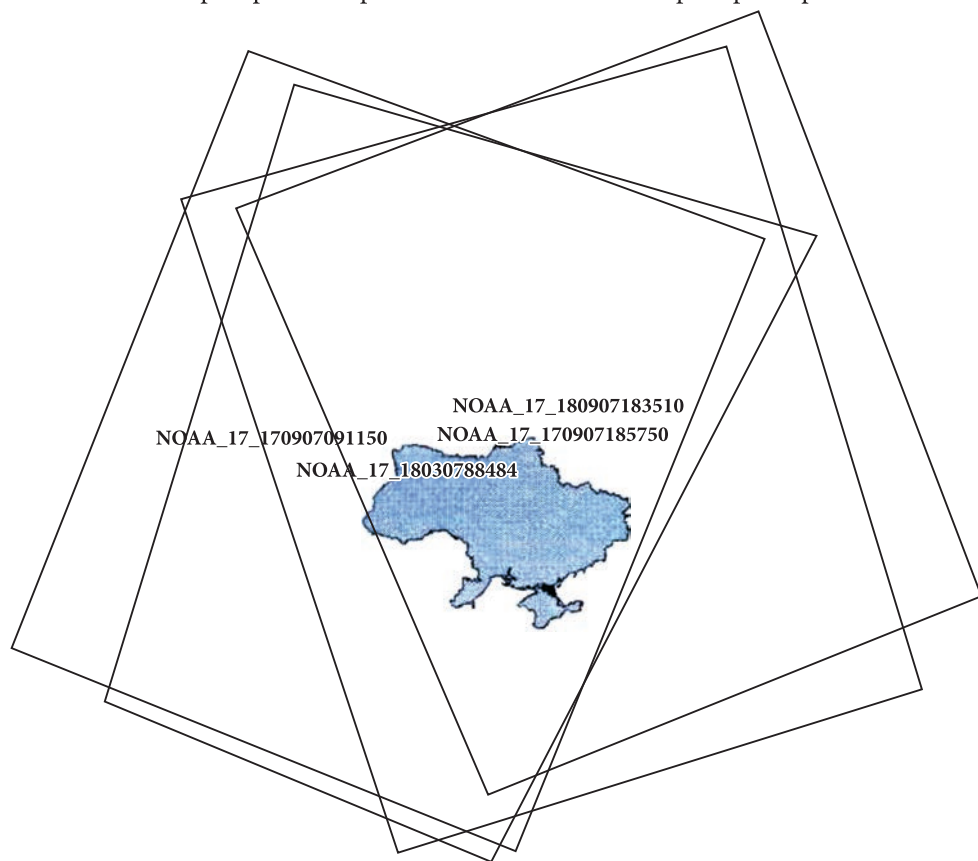


Рис. 1.5. Супутниковий знімок акваторії Азовського моря, отриманий із платформи NOAA-17
Джерело: за [47].

теми NOAA характеризуються значно нижчою просторовою роздільною здатністю (близько 1100 м), однак їх ключовою перевагою є висока частота спостережень і можливість охоплення великих акваторій.

Ширина смуги знімання є максимальною саме у супутників серії NOAA (до 3000 км), що дає змогу здійснювати оперативний огляд значних за площею морських просторів за один проліт. Це має особливе значення для швидкого виявлення масштабних явищ, як-от льодова обстановка, температурні аномалії або великі зони змін гідрофізичних параметрів морського середовища.

Супутникові платформи NOAA, TERRA та QuickBird характеризуються коротким інтервалом повторення знімання, який становить близько однієї доби, що забезпечує регулярне оновлення інформації про стан

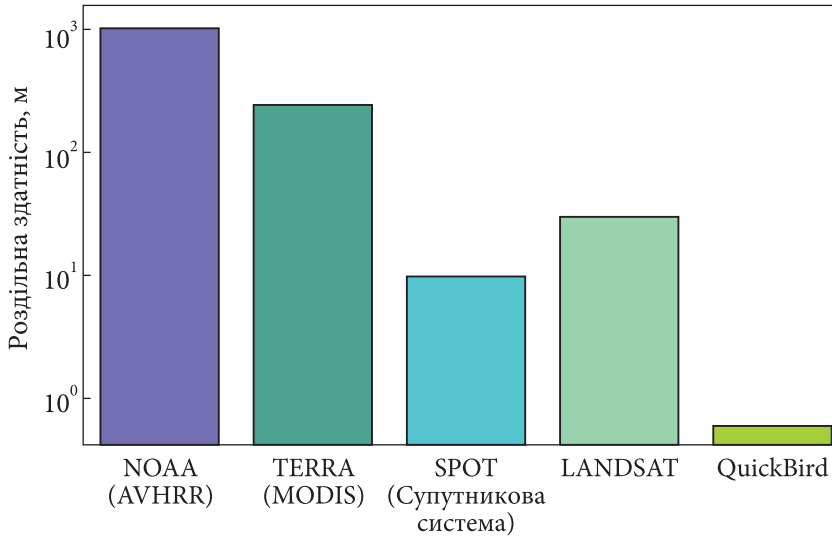


Рис. 1.6. Приклад геокартографічного представлення супутникового знімання акваторії Азовського моря
Джерело: адаптовано за [23, 48].

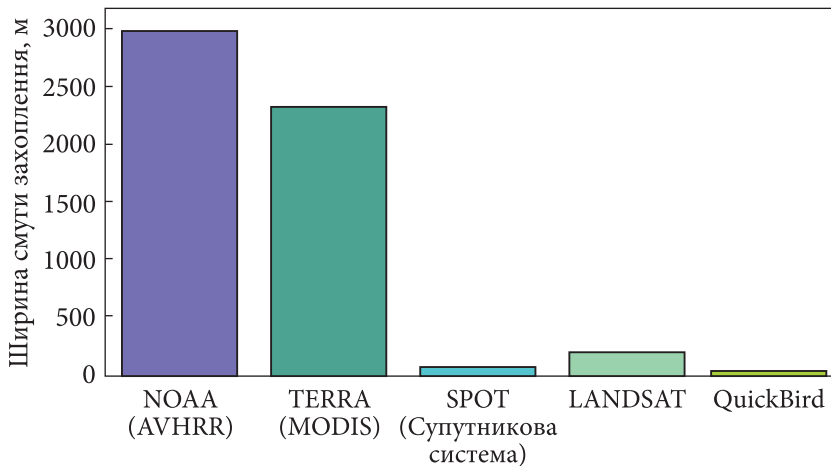


Рис. 1.7. Приклад геокартограми спектральної інформації супутникового знімання акваторії Азовського моря
Джерело: наведено за [47].

морського середовища. Для супутників серії *Landsat* цикл повторного покриття є суттєво довшим (приблизно 16 діб), однак отримані дані відзначаються стабільною якістю та широко застосовуються для довгострокового аналізу просторово-часових змін екологічних показників.

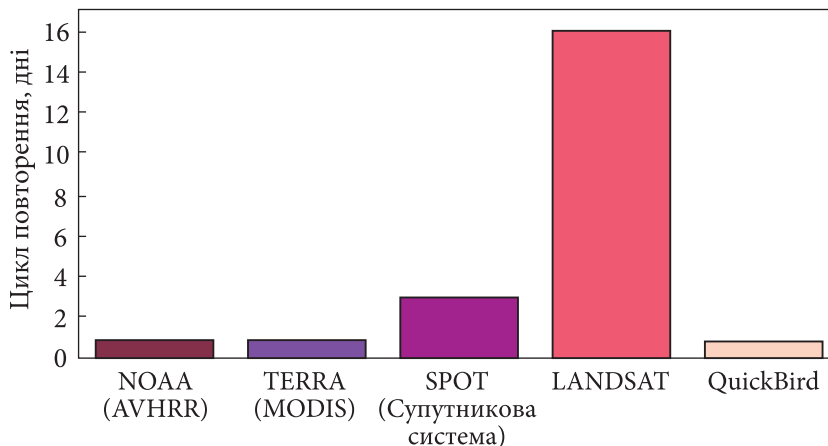


Рис. 1.8. Приклад геокартограми часових рядів даних щодо нафтових забруднень за матеріалами супутникового знімання Азовського моря
Джерело: наведено за [47].

Такі візуалізаційні матеріали створюють можливість оперативного порівняння ефективності різних супутникових платформ за критеріями просторової точності, масштабу покриття та оперативності отримання даних, що є визначальними параметрами під час вибору оптимального джерела аерокосмічної інформації для конкретних завдань екологічного моніторингу прибережних зон.

Узагальнюючи викладене, зазначимо, що створення фонду космічних знімків для акваторії Азовського моря слід розглядати не лише як технічний процес накопичення супутникових даних, а як формування комплексної інформаційної системи моніторингу прибережних і відкритих морських вод. Така система охоплює етапи збору, архівації, аналітичної обробки, візуалізації та прогнозування на основі аерокосмічної інформації. Інтеграція технологій у практику природоохоронної діяльності забезпечує системний підхід до реагування на зміни екологічного стану морського середовища та створює науково обґрунтовані передумови для прийняття ефективних управлінських рішень.

1.5. Міжнародний досвід використання матеріалів космічних знімків у завданнях моніторингу антропогенного забруднення морських акваторій

Міжнародна практика застосування матеріалів космічних знімків у сфері екологічного моніторингу морських акваторій є наочним прикладом ефективного поєднання передових інформаційних технологій та інстру-

ментів забезпечення екологічної безпеки в глобальному масштабі. Прибережні екосистеми, що характеризуються високим рівнем біорізноманіття та значним ресурсним потенціалом, відзначаються підвищеною вразливістю до впливу антропогенних чинників. Забруднення, зумовлене промисловими й комунальними стоками, аварійними та хронічними розливами нафтопродуктів, інтенсивною господарською діяльністю, нерегульованими рекреаційними навантаженнями та судноплавством, призводить до суттєвих змін гідрооптичних, хімічних і біологічних характеристик морських вод. Це, зі свого боку, зумовлює необхідність запровадження системного, безперервного та науково обґрунтованого контролю стану морського середовища.

Стрімкий розвиток космічних технологій суттєво розширив можливості спостереження за морськими акваторіями. Методи дистанційного зондування Землі з орбіти забезпечують отримання об'єктивної та порівнюваної інформації про стан довкілля на глобальному, регіональному й локальному рівнях. До ключових переваг супутникових спостережень належать значна площа охоплення, висока періодичність повторного знімання, можливість доступу до важкодоступних або потенційно небезпечних для натурних досліджень районів, а також здатність фіксувати швидкоплинні та просторово неоднорідні процеси, що відбуваються в морському середовищі.

Сучасні супутникові платформи здатні реєструвати широкий спектр параметрів водного середовища, які мають принципове значення для ідентифікації проявів антропогенного забруднення. Такими параметрами є: варіації гідрооптичних характеристик води, зокрема зміни кольору та каламутності, просторово-часова динаміка температурних полів і солоності, розподіл фітопланктону, а також наявність плівкових забруднень, зокрема нафтопродуктів. У межах спеціалізованих досліджень також здійснюється непряма оцінка вмісту важких металів і супутніх домішок. Використання мульти- та гіперспектральних режимів знімання уможливорює виявляти навіть незначні зміни у складі водного середовища, розпізнавати біологічні аномалії, локалізувати потенційні джерела забруднення та відстежувати траєкторії їх поширення під впливом гідродинамічних процесів.

Показовим прикладом упровадження комплексного підходу до супутникового моніторингу морських акваторій є міжнародний пілотний проєкт, реалізований у бухті Мамала поблизу острова Оаху (Гаваї, США) у 2002—2004 роках [42]. Основною метою цього дослідження було кількісне та якісне оцінювання впливу глибоководних скидів стічних вод на стан прибережної рекреаційної зони, зокрема в районі пляжу Вайкікі, який має велике соціально-економічне та туристичне значення.

У межах проєкту застосовано широкий спектр космічних платформ і сенсорів різної фізичної природи, що дало змогу реалізувати багатопараме-

тричний аналіз морського середовища. Зокрема, оптичні супутники *IKONOS* і *QuickBird* забезпечували отримання високодетальних панхроматичних і багатоспектральних зображень для аналізу просторового розподілу забруднень у прибережній зоні. Радіолокаційні системи *RADARSAT* та *ENVISAT* використовувались для фіксації поверхневих аномалій і деформацій, пов'язаних із плівковими забрудненнями, зокрема нафтового походження. Гіперспектральна апаратура *Hyperion* і багатоспектральний інструмент *ALI* супутника *EO-1*, а ще багатозональні сенсори *MODIS* і *ASTER*, встановлені на платформах *TERRA* та *AQUA*, забезпечували детальний спектральний аналіз характеристик водної поверхні та приповерхневого шару.

Оброблення супутникових даних здійснювалося як в оперативному режимі безпосередньо на місці проведення досліджень у Гонолулу, так і в межах постпроцесингових процедур із залученням синхронних гідрофізичних та метеорологічних спостережень. Комплексний аналіз отриманих результатів засвідчив високу мінливість гідродинамічного режиму бухти Мамала, зумовлену поєднанням змінних метеорологічних умов і припливно-відпливних процесів, що суттєво ускладнює механізми природного самоочищення акваторії. Було встановлено, що обсяги скидів стічних вод у досліджуваний район сягають 70 млн галонів на добу, що об'єктивно обґрунтовує необхідність запровадження додаткових заходів, спрямованих на зниження антропогенного навантаження та підвищення рівня екологічної безпеки прибережних вод.

За результатами аналізу супутникових спостережень було сформовано низку екологічно орієнтованих рекомендацій щодо зменшення антропогенного навантаження на прибережні морські екосистеми. Зокрема, обґрунтовано доцільність оптимізації режимів скидання стічних вод шляхом удосконалення конфігурації дифузорних систем, підвищення ефективності технологій очищення стоків, а також розширення інформаційного забезпечення органів державного управління й громадськості. Окрему увагу приділено необхідності впровадження систем безперервного екологічного моніторингу, базованих на використанні космічних даних і здатних оперативно відстежувати зміни стану морського середовища.

Подібні за концепцією проекти успішно реалізовані й в інших регіонах світу. Так, випадки нафтового забруднення у Чорному та Каспійському морях, у прибережних водах поблизу острова Сахалін і в акваторії Таїландської затоки були детально картографовані з використанням радіолокаційних супутникових систем *ERS-2*, *ENVISAT* та *RADARSAT*. У межах цих досліджень застосовувалися багатозональні супутникові знімки з різним спектральним охопленням, зокрема в інфрачервоному діапазоні, що забезпечувало можливість ефективного виявлення тонких плівок нафтопродуктів, аналізу просторово-часової динаміки фітопланктону, а ще змін температури й солоності морських вод.

Міжнародний досвід переконливо демонструє, що комплексне поєднання даних дистанційного зондування Землі — як оптичних, так і радіолокаційних — із результатами наземних і морських натурних спостережень формує надійну інформаційну основу для створення ефективних систем оцінювання стану морських екосистем. Отримані результати широко використовують у процесі формування державної екологічної політики, реалізації природоохоронних заходів, а також у процесі розроблення стратегій сталого управління прибережними територіями. В той самий час жорстка просторово-часова програма польоту космічних апаратів ДЗЗ (носіїв знімальної апаратури) обмежує оперативність та періодичність космічного знімання а також тривалість контакту з об'єктом спостереження. Цей недолік можливо зменшити за рахунок збільшення орбітального угруповання задіяних КА та систем ДЗЗ з космосу.

В умовах зростання інтенсивності антропогенного впливу космічний моніторинг морських акваторій набуває статусу одного з пріоритетних інструментів екологічного контролю. Його ключові переваги — значне просторове охоплення, регулярність спостережень, незалежність від погодних умов у разі використання радіолокаційних методів, висока точність і аналітична інформативність — забезпечують науково обґрунтовану базу для запобігання деградації морського середовища. Подальший розвиток супутникових технологій, розширення переліку реєстрованих параметрів, інтеграція з геоінформаційними системами та методами штучного інтелекту суттєво підвищуватимуть ефективність екологічного моніторингу морських і прибережних акваторій як на міжнародному рівні, так і в межах національних природоохоронних програм.

Висновок

У межах розділу здійснено комплексне дослідження сучасного стану нормативно-правового, організаційного та технологічного забезпечення моніторингу морських акваторій і прибережних зон України. Установлено, що національна система екологічного моніторингу морських регіонів перебуває у фазі структурної трансформації, зумовленої поєднанням глобальних екологічних викликів, зокрема кліматичних змін, зростання антропогенного навантаження та деградації біоресурсів, а також регіональних загроз, пов'язаних із наслідками воєнних дій. Виявлено обмеження чинних підходів до впровадження та використання цифрових технологій у практиці водного моніторингу, що проявляються в недостатньому рівні інтеграції аерокосмічних, геоінформаційних і сенсорних даних, а також у низькій адаптивності системи до швидкоплинних змін екологічної обстановки.

Проаналізовано чинну нормативно-правову базу України у сфері екологічного моніторингу морських акваторій з позицій її придатності до функціонування в умовах високої динаміки загроз, зокрема надзвичайних і воєнного характеру, що дало змогу ідентифікувати ключові прогалини та напрями її вдосконалення.

Обґрунтовано концептуальні підходи до адаптації нормативно-правового та організаційного забезпечення системи моніторингу з акцентом на інтеграцію технологій дистанційного зондування Землі, розподілених сенсорних мереж і автоматизованих методів оброблення великих обсягів даних у межах єдиного інформаційного середовища. Розроблено системний підхід до формування моделі інтегрованого управління екологічною безпекою прибережних вод, який передбачає скоординоване функціонування фонових, загальних і кризових режимів моніторингу на основі спільної інформаційно-аналітичної платформи та уніфікованих процедур обміну даними.

Отримані результати створюють науково-методологічне підґрунтя для переходу до нової парадигми державного управління водними ресурсами морських акваторій, орієнтованої на проактивне прогнозування екологічних ризиків, підвищення адаптивності до кризових ситуацій та реалізацію цифрової трансформації процедур екологічного нагляду.



У цьому розділі зосереджено увагу на концептуальних, технічних і прикладних аспектах використання інформаційних технологій у процесах космічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. В умовах загострення глобальних і регіональних екологічних викликів, зростання техногенного навантаження та посилення антропогенного впливу на морське середовище інтегрований моніторинг із застосуванням засобів дистанційного зондування Землі набуває визначального значення. Сучасні інформаційні технології, зокрема геоінформаційні системи, хмарні обчислювальні платформи, інструменти комп'ютерного зору, методи штучного інтелекту та глибокого навчання, формують технологічну основу високоточних систем екологічного аналізу. Вони забезпечують автоматизоване виявлення об'єктів і процесів забруднення, оцінювання просторово-часової динаміки екосистемних змін, а також прогнозування екологічних ризиків для прибережного середовища.

У розділі наведено узагальнену архітектуру програмно-аналітичних комплексів, що базуються на використанні супутникових даних різних місій, зокрема *Sentinel*, *Landsat*, *MODIS*, *WorldView* та інших, з урахуванням особливостей їх інтеграції з наземними сенсорними мережами та джерелами оперативної інформації. Розглянуто алгоритмічні підходи до векторизації, сегментації та класифікації даних дистанційних спостережень, а також методи оптимізації обчислювальних процесів із використанням сучасних апаратно-програмних рішень, а саме: паралельних обчислень на *GPU* і *CPU*, контейнеризації на основі *Docker*, оркестрації сервісів за допомогою *Kubernetes* і застосування хмарних платформ, як-от *Google Earth Engine* та *Amazon Web Services*.

Окрему увагу приділено застосуванню методів машинного навчання та глибоких нейронних мереж, зокрема

архітектур *CNN*, *U-Net* і *DeepLab*, для автоматизованої ідентифікації нафтових плям, зон евтрофікації, скупчень морського сміття та інших аномальних явищ у морському середовищі. Також проаналізовано практичні приклади реалізації комплексного підходу до космічного моніторингу в Чорноморському регіоні України з урахуванням його природно-ресурсного, рекреаційного та геополітичного значення. У фокусі дослідження перебувають питання формування тематичних екологічних карт, побудови цифрових моделей екологічних ризиків, створення систем оперативного попередження та використання прогнозного моделювання для оцінювання майбутнього стану морського середовища.

2.1. Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних

Інформаційні супутникові сервіси

Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних становлять базовий елемент сучасних екосистем управління просторовою інформацією, що використовується в екологічному, інфраструктурному, безпековому та природоохоронному контекстах. В умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, аерокосмічного моніторингу та методів штучного інтелекту саме такі платформи забезпечують інтеграцію, зберігання, аналітичне оброблення та візуалізацію значних обсягів супутникової інформації у зручному для користувача форматі. Це робить їх однаково затребуваними як у наукових дослідженнях, так і в діяльності органів державної влади, сил безпеки й оборони, природоохоронних структур та бізнесу.

Сучасні інформаційні платформи дистанційного зондування Землі, зокрема *Google Earth Engine*, *Copernicus Open Access Hub*, *NASA Earthdata*, *Sentinel Hub*, *USGS EarthExplorer*, а ще комерційні сервіси *Planet*, *Maxar SecureWatch* та інші, забезпечують доступ до багаточасових архівів супутникових знімків високої й надвисокої просторової роздільної здатності. Ці архіви містять мультиспектральні, гіперспектральні, теплові та радіолокаційні дані, що дає змогу здійснювати комплексний аналіз стану земної поверхні та водного середовища. Попри відмінності у спеціалізації, форматах представлення інформації та наборі інструментів, платформи об'єднані спільною функціональною метою — надати актуальну, достовірну та верифіковану інформацію про просторово-часові зміни природних і техногенних об'єктів [29].

Завдяки розвитку супутникових технологій і зростанню обчислювальних потужностей сервіси дистанційного зондування Землі стали невід'ємним інструментом моніторингу природних ресурсів, контролю землеко-

ристування, оцінювання водних ресурсів, картографування забруднень, реагування на надзвичайні ситуації та аналізу наслідків стихійних лих. У сфері екологічної та національної безпеки такі платформи застосовуються для виявлення руйнувань інфраструктури, моніторингу переміщення техніки, фіксації наслідків техногенних аварій або воєнних дій, контролю прикордонних територій і підтримки заходів цивільного захисту.

Окреме місце серед інформаційних супутникових сервісів посідає платформа *Google Earth Engine*, яка реалізує концепцію хмарної обробки великих масивів геопросторових даних. Вона підтримує розроблення алгоритмів аналізу мовами *JavaScript* і *Python*, містить вбудовані бібліотеки спектральних індексів (*NDVI*, *NDWI*, *NBR* та інші) і дає змогу оперативно виконувати аналіз змін за багаторічні часові інтервали. Платформа *Copernicus Open Access Hub*, що базується на даних супутників серії *Sentinel*, надає відкритий і безоплатний доступ до регулярних спостережень Європейського космічного агентства, що характеризуються високою просторовою точністю та широким територіальним охопленням і є особливо придатними для екологічного моніторингу.

Водночас комерційні сервіси, зокрема *Maxar SecureWatch*, забезпечують доступ до надвисокодетальних знімків із просторовою роздільною здатністю до 30 см, що дає змогу ідентифікувати дрібні елементи інфраструктури, транспортні засоби, техніку та локальні зони ураження. Такі можливості є критично важливими для завдань моніторингу в умовах воєнних дій, управління безпековими ризиками та відновлення критичної інфраструктури.

Сучасні інформаційні платформи супутникових даних не обмежуються лише функціями доступу до знімків. Вони формують комплексну екосистему інтегрованих сервісів, що включає аналітику в режимі реального часу, автоматизоване виявлення змін, генерацію картографічної продукції, тематичне дешифрування, обчислення статистичних показників і побудову моделей на основі методів штучного інтелекту та машинного навчання. Такі інструменти дають змогу користувачам не лише фіксувати поточний стан територій, а й прогнозувати потенційні ризики, оптимізувати управлінські рішення та формувати сценарії реагування.

Важливою перевагою інформаційних супутникових сервісів є їх відносна відкритість і доступність для широкого кола користувачів. Відкриті програми *Sentinel* і *Landsat* забезпечують безоплатний доступ до даних, що має особливе значення для країн, які не володіють власними супутниковими системами спостереження. Це сприяє розвитку наукових досліджень, громадського моніторингу та волонтерських ініціатив у сфері охорони довкілля, урбаністики, адаптації до змін клімату та збереження біорізноманіття. Паралельно приватні платформи, як-от *Planet*, *BlackSky*, *Capella Space* і *Maxar*, пропонують комерційні сервіси з високою частотою

оновлення та можливістю замовлення знімання за запитом, що робить їх особливо ефективними для задач оперативного моніторингу та управління кризовими ситуаціями.

Окрему групу становлять аналітичні платформи, орієнтовані на використання методів штучного інтелекту та глибокого навчання, які забезпечують автоматизоване розпізнавання об'єктів, класифікацію типів покриття, виявлення змін і аналіз температурних або екологічних аномалій. Сервіси на кшталт *Descartes Labs*, *Orbital Insight* та *Astraea EarthAI* реалізують підхід перетворення супутникових зображень на структуровану аналітичну інформацію, придатну для ухвалення стратегічних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки та сталого розвитку [30].

У контексті післявоєнного відновлення України інформаційні платформи супутникового моніторингу набувають особливого стратегічного значення. Вони забезпечують можливість об'єктивного оцінювання масштабів руйнувань, картографування знищених і пошкоджених населених пунктів, ідентифікації потенційно небезпечних територій, зокрема мінних полів, а також аналізу стану сільськогосподарських угідь. Крім того, супутникові сервіси дають змогу здійснювати моніторинг перебігу відновлювальних робіт, виявляти екологічні ризики в районах бойових дій і техногенних ушкоджень, надавати інформаційну підтримку міжнародним гуманітарним і відновлювальним програмам.

Інформаційні платформи та сервіси супутникових даних є невід'ємною складовою цифрової трансформації систем безпеки, екологічного управління та державного адміністрування в умовах поєднання глобальних і локальних викликів [30]. Їх інтеграцію до національних систем моніторингу та захисту слід розглядати не лише як впровадження сучасних технічних рішень, а й як стратегічний інструмент підвищення спроможності держави своєчасно реагувати на кризові ситуації, забезпечувати стійкість критичної інфраструктури, мінімізувати екологічні втрати та ефективно захищати життя і здоров'я населення.

Спектральні діапазони та їх значення для моніторингу

Спектральні діапазони в системах дистанційного зондування Землі є фундаментальною основою отримання інформації про природні й антропогенні процеси, що відбуваються в морських акваторіях та прибережних зонах. Здатність супутникових і аероплатформних сенсорів реєструвати електромагнітне випромінювання в різних інтервалах довжин хвиль дає змогу здійснювати багатопараметричний аналіз стану водного середовища, просторової структури узбережжя, біофізичних характеристик, рівня забруднення, проявів евтрофікації, змін берегової лінії та наслідків кліма-

тичних впливів. Саме поєднання інформації з видимого, інфрачервоного, короткохвильового та теплового спектральних діапазонів забезпечує комплексну оцінку екологічного стану акваторій.

У межах видимого спектра (400—700 нм) виділяють синій, зелений і червоний діапазони — найінформативніші для аналізу оптичних властивостей води. Ці спектральні канали широко застосовуються для оцінювання прозорості водного середовища, концентрації завислих речовин, біомаси фітопланктону та наявності зважених частинок (табл. 2.1). Зокрема, синій діапазон (приблизно 450—510 нм) характеризується високою проникною здатністю у водну товщу, що дає змогу оцінювати глибину проникнення світла та рівень чистоти води. Зелений діапазон (510—580 нм) є чутливим до вмісту хлорофілу *a* — ключового пігменту фотосинтетичної активності, у зв'язку з чим використовується для виявлення зон підвищеної біологічної продуктивності, процесів «цвітіння» води та розвитку евтрофікації. Червоний діапазон (600—700 нм) забезпечує можливість виділення прибережних структур, уточнення положення берегової лінії та ідентифікації ділянок із підвищеною концентрацією завислих речовин.

Ближній інфрачервоний діапазон (*NIR*, 700—900 нм) характеризується різкою контрастністю відбивних властивостей суходолу та води: водна поверхня практично повністю поглинає випромінювання цього діапазону, натомість рослинний і ґрунтовий покрив демонструє високу відбивну здатність. Це створює сприятливі умови для високоточного визначення межі «вода — суходіл», моніторингу підтоплення прибережних територій, аналізу динаміки берегової лінії, припливно-відпливних процесів і виявлення затоплених об'єктів, зокрема елементів інфраструктури або сільськогосподарських угідь [31].

Короткохвильовий інфрачервоний діапазон (*SWIR*, приблизно 1000—2500 нм) має принципове значення для аналізу фізичного стану прибе-

Таблиця 2.1. Інформативні спектральні діапазони для дослідження прозорості та оптичних властивостей морських вод

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

Джерело: складено за [14].

режних територій і морського середовища. У цьому спектральному інтервалі суттєво підвищується чутливість сенсорів до вологості ґрунтів, що дає змогу оцінювати процеси перезволоження та деградації берегових зон, а також здійснювати моніторинг пожежної небезпеки на островах і в приморських лісових масивах. Окрему практичну цінність *SWIR*-дані мають для виявлення нафтопродуктів на водній поверхні, оскільки нафта характеризується специфічними спектральними ознаками в цьому діапазоні. Це уможливорює ідентифікувати як аварійні розливи, пов'язані з морським транспортом, так і забруднення, що виникають у процесі підводного буріння або експлуатації шельфових родовищ.

Тепловий інфрачервоний діапазон (*TIR*, 8—14 мкм) використовується для дистанційного вимірювання температури поверхні моря (*Sea Surface Temperature*, *SST*), яка є одним із ключових параметрів у дослідженнях кліматичних змін та океанографічних процесів. Дані цього діапазону дають можливість аналізувати теплове забруднення прибережних вод, оцінювати вплив промислових об'єктів, зокрема атомних і теплових електростанцій, а ще моделювати теплові течії та просторовий розподіл термальних аномалій. Застосування *TIR*-інформації створює наукову основу для контролю зон впливу техногенних теплових викидів і оцінювання їхнього екологічного ефекту.

Радарні спектральні діапазони, що належать до мікрохвильового інтервалу (приблизно від 1 мм до 1 м), забезпечують можливість проведення моніторингу незалежно від метеорологічних умов і часу доби. Системи із синтезованою апертурою (*SAR*), зокрема сенсори супутника *Sentinel-1*, спроможні із високою просторовою точністю спостерігати динаміку хвильових процесів, відстежувати рух морських суден, виявляти нафтові плями, аналізувати зміни конфігурації берегової лінії, процеси розмиву, ерозії та осідання берегів [32]. Застосування методів радарної поляриметрії додатково розширює аналітичні можливості, зокрема дає змогу класифікувати типи поверхонь у зонах припливно-відпливних процесів, на мулових узбережжях і в прибережних низовинах.

Важливим інструментом комплексного використання інформації, отриманої в різних спектральних діапазонах, є спектральні індекси, спроможні трансформувати багатоканальні супутникові дані у кількісні показники стану природного середовища. Зокрема, індекс *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*) застосовується для надійного виділення водних поверхонь і аналізу змін їх меж. *NDVI* (*Normalized Difference Vegetation Index*) використовується для оцінювання стану та динаміки рослинного покриву в прибережних регіонах. *NDCI* (*Normalized Difference Chlorophyll Index*) — для визначення концентрації хлорофілу й аналізу біологічної продуктивності водних екосистем, натомість *FUI* (*Floating Unnatural Index*) дає змогу ідентифікувати скупчення антропогенних відходів і плавучого сміття в прибережних акваторіях.

Таблиця 2.2. Спектральні діапазони та індекси, що застосовуються для моніторингу прибережних зон

Діапазон спектра	Довжина, мкм	Призначення
Видимий (VNIR)	0,38—0,72	Візуалізація, класифікація об'єктів
Ближній ІЧ (NIR)	0,72—1,30	Визначення вегетаційного покриття, вологості
Середній ІЧ (SWIR)	1,30—3,00	Виявлення мінералів, вологи в ґрунтах
Тепловий ІЧ (TIR)	7,00—15,00	Вимірювання температури поверхні, виявлення теплових аномалій

Джерело: складено за [14].

Упродовж останніх років суттєвого поширення набули методи машинного навчання для мультиспектральної та гіперспектральної класифікації, що ґрунтуються на аналізі даних гіперспектрального зондування, яке може охоплювати сотні вузьких спектральних каналів. Поєднання таких даних з алгоритмами інтелектуального аналізу забезпечує підвищення точності розпізнавання типів поверхонь, забруднень і біологічних об'єктів, зокрема у складних прибережних умовах.

Використання супутникових даних у різних спектральних діапазонах створює передумови для виконання мультитимового аналізу стану морських акваторій, що уможливорює виявляти довгострокові та сезонні зміни екосистем, оцінювати динаміку біомаси, рівень і характер забруднення, а також здійснювати прогнозування надзвичайних ситуацій, якот штормів, повеней або аварійних витоків забруднювальних речовин (табл. 2.2). У цьому контексті інтеграція спектральної інформації з геоінформаційними системами здатна формувати високоточні аналітичні моделі, орієнтовані на підтримку прийняття рішень у сферах екологічного моніторингу, водного господарства, природоохоронного контролю та морської безпеки.

Отже, спектральні діапазони слід розглядати не лише як технічну характеристику супутникових сенсорів, а й як потужний аналітичний інструментарій, що забезпечує глибоке вивчення структури, динаміки та екологічного стану морських і прибережних зон. Їх коректне та методично обґрунтоване використання у поєднанні з сучасними платформами супутникового моніторингу відкриває нові можливості для ефективного управління морськими територіями, реалізації засад сталого розвитку та реагування на комплексні виклики сучасності.

Характеристики основних супутникових сенсорів

Супутникові сенсори, що застосовуються для моніторингу морських акваторій і прибережних зон, відрізняються за низкою ключових технічних характеристик, які безпосередньо визначають їх придатність для аналізу водного середовища. До таких характеристик належать просторове, спектральне, радіометричне та часове розрізнення, а ще ширина смуги знімання і стабільність калібрування. Комплексне розуміння цих параметрів є необхідною передумовою коректного вибору супутникових платформ і методів обробки даних у системах дистанційного зондування Землі, зокрема під час вирішення завдань оцінювання температури поверхні моря, якості води, виявлення забруднень, картографування берегової лінії та аналізу біопродуктивності акваторій (табл. 2.3) [32].

Супутники серії Landsat (TM, ETM+, OLI/TIRS). Програма *Landsat*, що реалізується у співпраці NASA та Геологічної служби США (USGS), є одним із найдовших і найстабільніших джерел мультиспектральних супутникових даних для моніторингу земної поверхні та внутрішніх і морських водойм. Зокрема, супутник *Landsat 8* оснащений сенсорами *OLI (Operational Land Imager)* і *TIRS (Thermal Infrared Sensor)*, які забезпечують реєстрацію випромінювання в 11 спектральних діапазонах. Просторова роздільна здатність становить 30 м для більшості мультиспектральних каналів і близько 100 м у тепловому інфрачервоному діапазоні. Важливою перевагою сенсора *OLI* є наявність прибережного (*Coastal aerosol*) каналу, що суттєво підвищує точність досліджень мілководних і прибережних зон, зокрема під час аналізу прозорості води та концентрації завислих речовин.

Sentinel-2 (MSI). Супутники *Sentinel-2A* і *Sentinel-2B* є частиною європейської програми *Copernicus*, оснащені мультиспектральним сенсором *MSI (Multispectral Instrument)*. Він охоплює 13 спектральних каналів у видимому, ближньому та короткохвильовому інфрачервоних діапазонах із просторовим розрізненням 10, 20 та 60 м. Завдяки високій спектральній деталізації у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах дані *Sentinel-2* є особливо ефективними для оцінювання прозорості води, концентрації хлорофілу, процесів «цвітіння» водоростей і виявлення нафтових забруднень. Використання двох супутників у сузір'ї забезпечує короткий цикл повторного знімання — до 5 діб, що є важливою перевагою для оперативного екологічного моніторингу.

MODIS (платформи Terra та Aqua). Сенсор *MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)*, встановлений на супутниках *Terra* та *Aqua*, забезпечує глобальне охоплення з надзвичайно широкою смугою зйомки (до 2330 км) і високою періодичністю спостережень, що досягає щоденного циклу. *MODIS* має 36 спектральних каналів у видимому, інфрачервоному та тепловому діапазонах, що створює можливості для

комплексного океанографічного аналізу. На його основі здійснюється моніторинг температури поверхні моря (SST), концентрації хлорофілу, вмісту зважених частинок, показників первинної продукції та інших біофізичних параметрів водного середовища. Просторова роздільна здатність сенсора варіюється від 250 м до 1 км залежно від спектрального каналу. Попри відносно невисоку деталізацію, *MODIS* є ефективним інструментом для дослідження великих морських акваторій і регіонального аналізу океанографічних процесів.

VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Сенсор *VIIRS*, встановлений на супутниках *Suomi NPP* та *NOAA-20*, є логічним розвитком технологічної концепції *MODIS* і характеризується підвищеною геометричною та радіометричною точністю. Просторова роздільна здатність у денних каналах досягає 375 м, що забезпечує кращу деталізацію порівняно з *MODIS*. Дані *VIIRS* широко використовуються для моніторингу морських акваторій, зокрема для оцінювання температури поверхні океану, біопродуктивності, виявлення зон інтенсивного розвитку фітопланктону та аналізу динаміки водних мас.

Sentinel-3 (OLCI, SLSTR, SRAL). Супутник *Sentinel-3* програми *Copernicus* оснащений комплексом спеціалізованих сенсорів, що забезпечують багатопараметричний аналіз морських акваторій. Сенсор *OLCI (Ocean and Land Colour Instrument)* має 21 спектральний канал і просторову роздільну здатність близько 300 м, що робить його ефективним для оцінювання стану фітопланктону та біооптичних характеристик води. *SLSTR (Sea and*

Таблиця 2.3. Характеристики супутникових сенсорів, що застосовуються для картографування берегової лінії та оцінювання біопродуктивності морських акваторій

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

Джерело: складено за [14, 48].

Land Surface Temperature Radiometer) забезпечує вимірювання температури поверхні моря та суші з просторовою роздільною здатністю близько 1 км у тепловому інфрачервоному діапазоні. Сенсор *SRAL* призначений для радіолокаційної альтиметрії та дозволяє з високою точністю (на рівні кількох сантиметрів) визначати висоту морської поверхні, що є важливим для дослідження хвильових процесів і змін рівня моря.

WorldView-2/WorldView-3. Комерційні супутники *WorldView-2* і *WorldView-3* належать до класу надвисокодетальних платформ і забезпечують просторову роздільну здатність до 0,3 м у панхроматичному режимі та близько 1,2 м у мультиспектральному. Такі характеристики дають змогу виконувати детальний аналіз берегової лінії, оцінювати стан портової та прибережної інфраструктури, локалізувати джерела скидів забруднювальних речовин і виявляти ділянки скупчення водоростей. Сенсор *WorldView-2* має 8 мультиспектральних каналів, зокрема спеціалізовані прибережні та жовті канали, що підвищує інформативність досліджень мілководних зон.

Радарні сенсори: Sentinel-1, TerraSAR-X, RADARSAT-2. Активні радіолокаційні сенсори, що працюють у мікрохвильовому діапазоні, забезпечують можливість спостережень незалежно від метеорологічних умов і освітлення. Такі системи є особливо ефективними для виявлення нафтових плям, моніторингу льодової обстановки, пошуку й відстеження морських суден, а також контролю затоплення прибережних територій. Наприклад, супутник *Sentinel-1* працює в С-діапазоні, забезпечує просторову роздільну здатність до 10 м і характеризується регулярним циклом оновлення даних (6—12 днів), доступ до його даних є відкритим, що суттєво розширює можливості оперативного екологічного моніторингу.

2.2. Інформаційні технології в супутниковому моніторингу прибережних зон

Платформи обробки та візуалізації супутникових даних

Сучасні інформаційні технології є визначальним чинником перетворення первинних супутникових спостережень на аналітично значущу інформацію, придатну для підтримки ухвалення управлінських рішень у сфері екологічного моніторингу прибережних зон. З огляду на зростання обсягів даних, що надходять від численних супутникових місій, ключове значення набувають програмні платформи, здатні забезпечувати ефективну обробку, аналіз і візуалізацію багатовимірної просторово-часової інформації.

Одним із базових інструментів глобального рівня є платформа *NASA Earthdata*, яка надає доступ до широкого спектра супутникових продуктів та сервісів для їх аналізу. Зокрема, вебінтерфейс *Worldview* здатен в інтерактивному режимі переглядати понад тисячу глобальних шарів супутни-

кових зображень у повній просторовій роздільній здатності, оперативно аналізувати динаміку природних і техногенних процесів, а ще завантажувати відповідні набори даних для подальшої обробки. Такі можливості є особливо цінними для дослідження змін у прибережних акваторіях, зокрема температурних аномалій, розвитку фітопланктону та наслідків екстремальних природних явищ.

Значний внесок у сферу візуалізації екологічної інформації роблять сервіси NOAA NESDIS, які пропонують інтерактивні картографічні інструменти для аналізу даних спостережень за океанами й атмосферою. Накладання супутникових показників на цифрові карти дає можливість спростити інтерпретацію складних екологічних процесів, виявляти просторові закономірності та тенденції, а також оцінювати динаміку змін у прибережних зонах у часовому розрізі.

Окрему групу становлять комерційні та напівкомерційні аналітичні платформи, орієнтовані на прикладне використання супутникових даних. Так, компанія EOS Data Analytics (EOSDA) розробляє програмні рішення для автоматизованого аналізу супутникових зображень у сферах сільського та лісового господарства, управління земельними ресурсами й екологічного моніторингу. Використання методів штучного інтелекту та машинного навчання дає змогу перетворювати великі масиви супутникових даних на структуровану інформацію, придатну для практичного застосування, зокрема для оцінювання стану прибережних екосистем і прогнозування потенційних ризиків.

Отже, платформи обробки та візуалізації супутникових даних формують технологічну основу сучасних систем космічного моніторингу прибережних зон. Їх поєднання з геоінформаційними системами, хмарними обчисленнями та інтелектуальними методами аналізу забезпечує підвищення оперативності, точності та аналітичної глибини екологічних досліджень, що є критично важливим для ефективного управління морськими та прибережними територіями.

Використання штучного інтелекту та машинного навчання

Методи штучного інтелекту та машинного навчання набувають дедалі більшого значення у процесах оброблення та аналізу супутникових даних дистанційного зондування Землі. Їх застосування дає змогу перейти від традиційних напіваавтоматизованих підходів до повністю автоматизованих технологій виявлення, класифікації та інтерпретації об'єктів і процесів на супутникових зображеннях. Це суттєво підвищує оперативність і точність моніторингу прибережних зон, особливо за умов великих обсягів даних і необхідності швидкого реагування на екологічні загрози.

Алгоритми машинного навчання, передусім методи глибокого навчання, ефективно використовуються для розв'язання задач сегментації та класифікації супутникових зображень. Застосування згорткових нейронних мереж (CNN), архітектур типу *U-Net*, *DeepLab* та їх модифікацій дає змогу автоматично виділяти складні об'єкти на знімках, серед яких берегова лінія, плями нафтових забруднень, зони евтрофікації та скупчення морського сміття. Так, у низці досліджень, присвячених аналізу даних супутника *Sentinel-2*, продемонстровано високу ефективність глибоких сегментаційних моделей для виявлення скупчень морського сміття, зокрема пластикових відходів, у прибережних акваторіях.

Використання методів штучного інтелекту також сприяє підвищенню стійкості результатів аналізу до шумів, атмосферних впливів і варіабельності освітлення, що є характерним для морських і прибережних умов. Крім того, поєднання машинного навчання з мультиспектральними та гіперспектральними даними відкриває можливості для глибокого аналізу біофізичних характеристик водного середовища та прогнозування розвитку небезпечних екологічних процесів.

Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи

Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи є ключовим етапом формування комплексних інформаційно-аналітичних моделей для дослідження та прогнозування екологічних процесів у прибережних зонах. Поєднання даних дистанційного зондування Землі з іншими просторовими та атрибутивними наборами інформації в межах ГІС-середовищ дає змогу здійснювати багатофакторний аналіз, візуалізацію та просторово-часове моделювання змін морського середовища.

Основна відмінність геоінформаційних технологій від решти сучасних інформаційних технологій полягає в наявності потужного апарату просторового аналізу даних про територію, що дає змогу формувати якісно нові види даних синтетичного і аналітичного характеру, забезпечуючи до них оперативний доступ користувачів за запитам.

Вирішити питання забезпечення користувачів результатами моніторингу дозволило застосування геоінформаційних систем (ГІС), які представляють собою інформаційні системи, призначені для роботи з даними, що мають прив'язку до просторових або географічних координат. Процес збору даних дистанційного зондування та їх використання в ГІС схематично представлені на рис. 2.1.

Ефективність спільного використання ГІС та даних ДЗЗ, дослідження окремих аспектів якого є однією з задач створюваної системи, неодноразово доведено на практиці.

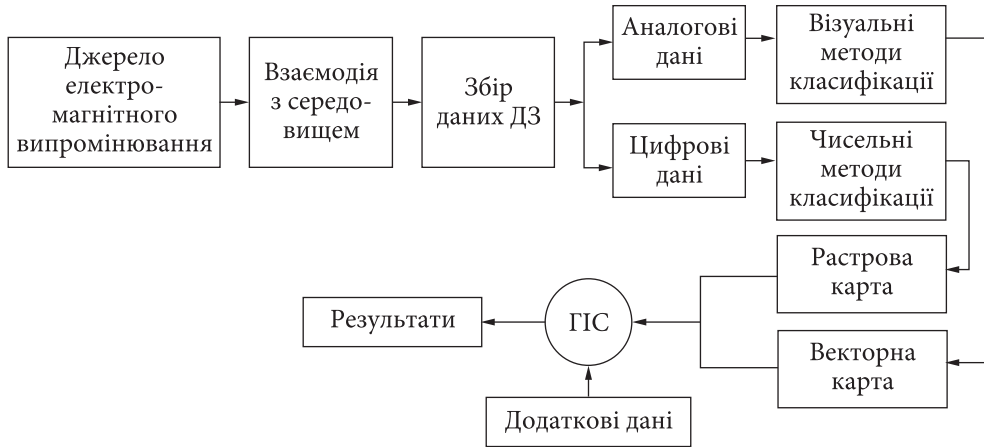


Рис. 2.1. Інтеграція даних дистанційного зондування в ГІС

Джерело: складено за даними [50].

ГІС класифікують як:

1. Програмні засоби обробки даних дистанційного зондування — це пакети обробки зображень, забезпечені різним математичним апаратом, що дає можливість проводити операції зі сканованими або записаними в цифровій формі знімками поверхні Землі: *ERDAS Imagine*, *ENVI*, серія продуктів *Intergraph* (США), *ER Mapper* (Австралія).

2. Інструментальні ГІС (ГІС-пакети) — повнофункціональні пакети інструментів для оброблення та представлення даних в географічних системах координат: *ArcGIS*, *MGE Intergraph*, *MapInfo* (США), *SICAD* (Німеччина).

3. ГІС-в'юери — пакети з обмеженою можливістю редагування даних, призначені в основному для візуалізації і виконання запитів до баз даних, у тому числі і графічних підготовлених у середовищі інструментальних ГІС: *ArcReader*, *ArcExplorer* (ESRI, США), *WinCAT* (Simens Nixdorf, Німеччина).

Найбільш популяризоване в Україні програмне забезпечення, яке можливо використовувати для створення системи комп'ютерної підтримки рішень, це:

1. *ArcGIS* — універсальна система програм для створення, управління, інтеграції, аналізу та розповсюдження географічних даних на будь якому рівні, від великої розподіленої корпорації до кінцевого користувача. Програма розроблена Інститутом досліджень природних систем США (ESRI). За допомогою *ArcGIS* можна виконувати такі операції:

- перетворювати векторні карти в растрові;
- створювати буферні зони по відстані чи близькості об'єктів;
- створювати карти щільності точкових об'єктів;
- створювати безперервні поверхні по точках;
- будувати ізолінії;

- розраховувати кути нахилу, відмивку рельєфу;
- виконувати алгебраїчні операції та логічні запити до серії карт;
- готувати та оформлювати карти для друку;
- експортувати/імпортувати у різні цифрові формати тощо.

До недоліків даної системи можна віднести її високу ціну та вимоги до високої кваліфікації користувачів.

2. *ITT ENVI (Environment for Visualizing Images)* — середовище для відображення знімків. Містить найбільш повний пакет необхідних інструментів та функцій для візуалізації, аналізу та представлення цифрових зображень.

3. *IDL* — мова програмування для виконання багаточисельних математичних функцій та графічної візуалізації зображень, спроможна поєд-

Таблиця 2.4. Функції оброблення даних у ГІС

№ функції	Функція
1	Інформаційно-довідкова функція
2	Функція автоматизованого картографування
3	Функція просторового аналізу і моделювання природних, природно-господарських та соціально-економічних територіальних систем
4	Функція моделювання процесів
5	Функція підтримки прийняття рішень
5.1	Програмно-організовані банки просторової і атрибутивної інформації
5.2	База знань, що складається з блоку аналізу і моделювання, що містить набір моделей просторового аналізу і просторово-часового моделювання, а також довідково-інформаційного блоку, який містить формалізовану довідково-нормативну базу з даної проблеми
5.3	Блок технологій штучного інтелекту, який забезпечує механізм формально-логічного висновку і прийняття рішення на основі інформації, наявної в базі даних
5.4	Інтерфейс користувача: 1. Об'єктів в Азовському та Чорному морях. 2. Надводної обстановки в районі Керченської протоки. 3. Часових змін інфраструктури портів. 4. Положення та стану газо-нафтовидобувних веж. 5. Стану льодової обстановки та забруднень поверхнево-активними речовинами. 6. Температури водної поверхні Азово-Чорноморського басейну. 7. Карта надводних об'єктів за даними радіолокаційної зйомки. Створення цих карт показує практичну можливість та перспективність використання даних ДЗЗ

нати свої функції і багатокрокові процедури аналізу даних як графічні інтерактивні програми, що викликаються в *ENVI*, або як командні рядки в середовищі *IDL*. Крім того, *IDL* приваблива для виконання математичних, статистичних та модельних програм та забезпечує підтримку більшості популярних операційних систем.

4. *IMAPP* — програмний засіб обробки даних ДЗЗ, призначений для оброблення даних сенсору *MODIS* супутників *TERRA* і *AQUA*. Функціонально здійснює розпакування вихідного бітового потоку і генерацію стандартних продуктів у форматі *EOS-HDF*: Рівня-1A (*MOD01*) і Рівня-1B (*MOD02*, географічно прив'язані і геометрично калібровані).

Слід підкреслити, що сучасні ГІС активно застосовуються для виконання різноманітних тематичних завдань щодо оброблення геопросторових даних за багатьма тематичними напрямками. Напрямок висвітлення морської обстановки не є виключенням.

Аналіз програм та методів їх використання уможливають представити функції оброблення даних у ГІС необхідних для моніторингу надводної обстановки (табл. 2.4).

Одним із важливих напрямів застосування ГІС є моделювання змін берегової лінії, ґрунтоване на використанні багаточасових супутникових зображень для аналізу процесів ерозії, акумуляції та трансформації прибережних територій. Такі підходи спроможні оцінювати швидкість і напрям змін берегової зони, а ще прогнозувати потенційні ризики для інфраструктури й природних екосистем.

Іншим суттєвим напрямом є моніторинг якості морських вод, що базується на аналізі спектральних характеристик водних мас з метою виявлення різних типів забруднень, зокрема нафтових плям, зон цвітіння водоростей і підвищеної каламутності. Інтеграція таких даних у ГІС дає можливість просторово локалізувати осередки забруднення та відстежувати їх динаміку у часі.

Крім того, геоінформаційні системи широко застосовуються для оцінювання впливу кліматичних змін на прибережні екосистеми. Аналіз багаторічних супутникових спостережень температури поверхні моря, його рівня та інших параметрів уможливорює дослідження довгострокових тенденцій, пов'язаних з глобальним потеплінням, і формування науково обґрунтованих сценаріїв адаптації прибережних територій до змін клімату.

Інтеграція супутникових даних у геоінформаційні системи створює основу для побудови комплексних моделей екологічного моніторингу, що поєднують можливості дистанційного зондування, просторового аналізу та прогнозування, і є ефективним інструментом підтримки управлінських рішень у сфері охорони морського та прибережного середовища.

2.3. Фізичні основи космічного моніторингу морських акваторій

Оптичний діапазон

У межах космічного моніторингу морських акваторій в оптичному діапазоні електромагнітного спектра застосовуються як пасивні, так і активні методи дистанційного зондування Землі. Пасивні методи ґрунтуються на реєстрації відбитого сонячного випромінювання, яке формується внаслідок взаємодії падаючого потоку з атмосферою та підстильною поверхнею. Для оптичного діапазону власним випромінюванням атмосфери та морської поверхні, як правило, можна знехтувати, оскільки його внесок є незначним порівняно з інтенсивністю відбитого сонячного світла. Саме тому пасивні методи становлять основу більшості сучасних супутникових систем оптичного спостереження з космосу.

Активні методи в оптичному діапазоні базуються на використанні лідарних систем, де інформативним сигналом є відбите монохроматичне випромінювання, згенероване самим приладом. Такі системи дають змогу отримувати високоточну інформацію про вертикальну структуру атмосфери та водної товщі, однак через складність реалізації й обмежену зону охоплення їх застосування у супутникових методах оптичного зондування поки що є значно менш поширеним. У зв'язку з цим у сучасних космічних системах дистанційного зондування основна роль в оптичному діапазоні належить пасивним методам спостереження.

Ключовою характеристикою взаємодії електромагнітного випромінювання оптичного діапазону з досліджуваним середовищем є коефіцієнт спектральної яскравості (КСЯ), який є фундаментальним параметром під час інтерпретації супутникових даних. Коефіцієнт спектральної яскравості $\rho(l)$ визначається як відношення яскравості поверхні в заданому напрямку $B(l)$ до яскравості ідеально дифузної розсіювальної поверхні $B_0(l)$, що має коефіцієнт відбиття, рівний одиниці, і освітлюється в ідентичних умовах:

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

У спектральних вимірюваннях як еталонний розсіювач зазвичай розглядають поверхні, здатні рівномірно відбивати електромагнітне випромінювання в усьому робочому діапазоні довжин хвиль. До таких поверхонь належать, зокрема, гіпсові пластини, а ще зразки, вкриті шаром сульфату барію чи подібних матеріалів, оптичні властивості яких наближені до ламбертового розсіювання. Застосування подібних еталонів забезпечує коректну нормалізацію спектральних вимірювань та уніфікацію результатів спостережень.

У разі взаємодії світлового випромінювання з водною поверхнею сумарний потік, що реєструється над акваторією, формується двома фізично різними складовими. Перша з них пов'язана з відбиттям випромінювання на межі поділу «повітря — вода» і характеризується коефіцієнтом дзеркального відбиття. Друга складова виникає внаслідок проникнення світла у водну товщу, його розсіювання та часткового повернення з підповерхневих шарів, описаного коефіцієнтом дифузного відбиття.

Інтенсивність дзеркальної компоненти визначається величиною падного світлового потоку та значенням коефіцієнта дзеркального відбиття, який, зі свого боку, залежить від фізичних властивостей і поточного стану водної поверхні. Варіації цього коефіцієнта зумовлюються змінами мікрорельєфу поверхні та ефективного комплексного показника заломлення у приповерхневому шарі води.

До основних чинників, що впливають на величину коефіцієнта дзеркального відбиття, належать хвильові процеси, наявність нафтових або інших поверхневих плівок, утворення піни, біологічне заростання макрофітами, а також різноманітні поверхневі неоднорідності. Сукупна дія цих факторів істотно змінює характер відбиття світла і, відповідно, спектральну сигнатуру водної поверхні, що має принципове значення для задач космічного моніторингу морських акваторій. Для гладенької водної поверхні КДЗВ можна розрахувати за формулою Френеля, що в разі нормального падіння променів на водну поверхню має вигляд:

$$R_{\phi}(\lambda) = \frac{(n(\lambda) - 1)^2 + \kappa^2(\lambda)}{(n(\lambda) + 1)^2 + \kappa^2(\lambda)},$$

де n — відносний показник заломлення світла на межі поділу повітря-вода; κ — показник поглинання світла водою.

Використання наведеного аналітичного виразу дає змогу інтерпретувати зміну інтенсивності сигналу, що реєструється методами дистанційного зондування Землі, у разі появи на водній поверхні суцільних або багатошарових плівкових утворень, товщина яких значно перевищує довжину хвилі падаючого випромінювання ($d \gg \lambda$), а також у випадках біологічного заростання акваторій. За цих умов відбувається істотна модифікація відбивних властивостей поверхні, що безпосередньо впливає на спектральні характеристики зафіксованого сигналу.

У контексті екологічної безпеки водних об'єктів особливу практичну цінність має можливість дистанційного виявлення нафтових плівок на поверхні морських і прибережних вод. Такі плівки суттєво змінюють оптичні параметри межі «повітря — вода», що створює передумови для їх надійної ідентифікації за даними космічних спостережень.

Кількісна оцінка ефективності виявлення нафтових плівок, як правило, здійснюється із використанням контрастного критерію коефіцієнта відбиття R , який дає змогу порівняти відбивні характеристики забрудненої та фонові водних поверхонь та визначити ступінь їх спектральної відмінності.

Ця формула пояснює зміни величини сигналу, що реєструється методами ДЗЗ, за наявності на водній поверхні товстих плівок ($d \gg l$) і зростання водойм. У контексті 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 :

$$K(\lambda) = \frac{R(\lambda) - R_{\phi}(\lambda)}{R_{\phi}(\lambda)},$$

де R і R_{ϕ} — спектральні коефіцієнти відбивання відповідно нафти і фонові водної поверхні.

В оптичному спектральному діапазоні відбивні властивості нафтових плівок істотно відрізняються від характеристик чистої водної поверхні. Коефіцієнт відбиття нафти, як правило, має відносно стабільне значення в межах видимого діапазону, натомість для води спостерігається закономірне зменшення відбивної здатності зі зростанням довжини хвилі. Унаслідок цього на космічних знімках, отриманих в оптичному діапазоні, товсті нафтові плівки проявляються у вигляді світліших ділянок порівняно з фоновією водною поверхнею.

Експериментальні та теоретичні дослідження свідчать, що визначальний внесок у формування відбитого світлового потоку від нафтової плівки роблять інтерференційні процеси всередині неї. Коефіцієнт відбиття в такому випадку набуває коливального характеру, причому амплітуда інтерференційних максимумів і мінімумів залежить від товщини плівки d . Зі зростанням товщини нафтового шару інтерференційні коливання поступово згасають, що пов'язано з посиленням поглинання світлового випромінювання нафтою.

Швидкість згасання інтерференційних ефектів визначається, зокрема, величиною уявної частини комплексного показника заломлення нафти, яка характеризує її поглинальні властивості. Що більшим є цей параметр, то інтенсивніше відбувається ослаблення відбитого сигналу за збільшення товщини плівки.

У природних умовах товщина нафтової плівки є просторово неоднорідною і змінюється як у радіальному напрямку (від центральної частини плями до її периферії), так і в часі під впливом гідродинамічних, метеорологічних і біофізичних чинників. Унаслідок цього на космічних зобра-

женнях нафтових забруднень часто спостерігається характерна смугаста структура, що проявляється у чергуванні світлих і темних зон, особливо в крайових областях плями. Така просторово-спектральна неоднорідність є важливою діагностичною ознакою за дистанційного виявлення та ідентифікації нафтових забруднень морських акваторій.

Розглянемо дифузну складову світлового потоку, що формується внаслідок взаємодії електромагнітного випромінювання з водною поверхнею і характеризується коефіцієнтом дифузного відбиття. Значення цього коефіцієнта визначається сукупністю первинних гідрооптичних параметрів водного середовища, до яких належать коефіцієнти ослаблення α , розсіювання β , поглинання κ , а також просторово-кутові характеристики розсіяного випромінювання, що описуються індикатрисою розсіювання.

Первинні гідрооптичні характеристики, зі свого боку, залежать від концентрації та складу розчинених і завислих домішок у воді. З позицій екологічної безпеки морських і прибережних акваторій особливе значення має аналіз просторової мінливості концентрацій завислих речовин, оскільки саме вони істотно впливають на формування оптичного сигналу. На супутникових зображеннях, отриманих у видимому діапазоні спектра, акваторії з підвищеним вмістом завислих частинок, як правило, проявляються у вигляді яскравіших ділянок порівняно з фоновими водними масами. 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 густини. 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 β_{01} змінюється в невеликих межах залежно від температури води і величини.

Розглянуті спектральні закономірності первинних гідрооптичних характеристик чистої води визначають поступове зменшення коефіцієнта дифузного відбиття зі зростанням довжини хвилі. Максимальні значення цього коефіцієнта спостерігаються у короткохвильовій частині видимого спектра, що відповідає синьо-блакитній області, а у ближньому та середньому інфрачервоному діапазонах значення КДВ досягають мінімуму.

У природних водних середовищах оптично активні розчинені компоненти представлені переважно розчиненою органічною речовиною забарвленого типу, яку в науковій літературі часто позначають як «жовту речовину». Її вплив на формування підповерхневого відбитого світлового потоку є найбільш вираженим у короткохвильовій частині оптичного

діапазону, де поглинальні властивості цієї складової істотно змінюють спектральну структуру сигналу.

Розсіювання електромагнітного випромінювання на завислих частинках водної товщі має складний характер і залежить від довжини хвилі випромінювання, що падає, гранулометричних характеристик частинок, їх геометричної форми та оптичних параметрів. Загалом частинки великих розмірів розсіюють світло практично без вираженої спектральної селективності, а для дрібнодисперсних завислих частинок характерне зменшення інтенсивності розсіювання зі зростанням довжини хвилі. Водночас цей спад є менш крутим, ніж у випадку молекулярного розсіювання в чистій воді.

Поглиналильні властивості завислих частинок значною мірою визначаються їхнім походженням. Для неорганічних мінеральних домішок внесок у поглинання світла зазвичай є незначним і часто може бути проігнорований. Натомість у випадку завислих частинок біологічного походження — як-от фітопланктон і детрит — спектральний коефіцієнт поглинання має виражені локальні максимуми. Положення та амплітуда цих максимумів визначаються концентрацією присутніх у клітинах фотосинтетичних пігментів.

З позицій управління екологічною безпекою водних об'єктів особливу практичну значущість має оцінка вмісту хлорофілу *a* у фітопланктоні, оскільки цей показник є інформативним індикатором рівня евтрофування водних екосистем і широко використовується при дистанційному моніторингу якості морських та прибережних 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 умови підвищеного вмісту у фітопланктоні додаткових фотосинтетичних пігментів у спектрі коефіцієнта яскравості можуть формуватися локальні мінімальні значення. Аналіз спектральних залежностей первинних гідрооптичних характеристик свідчить, що спектральна крива коефіцієнта дифузного відбиття має виражений максимум у центральній частині оптичного діапазону. Це пояснюється тим, що в короткохвильовій області значення КДВ зменшується внаслідок поглинання розчиненою забарвленою органічною речовиною, натомість у довгохвильовій та ближній інфрачервоній частинах спектра визначальним чинником стає поглинання чистою водою.

Зі зростанням концентрації завислих речовин положення спектрального максимуму коефіцієнта дифузного відбиття зміщується у бік більших довжин хвиль. Окрім цього, у спектральній залежності КДВ можуть з'являтися локальні мінімуми, зумовлені вибіркоvim поглинанням світла пігментами фітопланктону. У водах з дуже високою каламутністю спектральний вплив пігментів зазвичай проявляється лише у вигляді однієї смуги поглинання поблизу довжини хвилі 675 нм.

У прозорих водних масах із низькою концентрацією органічних завислих речовин характерні мінімуми в спектрі коефіцієнта дифузного відбиття, пов'язані з пігментним поглинанням, можуть бути практично відсутні. Проте навіть у таких умовах форма спектральної залежності КДВ містить інформацію про вміст фітопланктону. Слід зазначити, що зменшення інтенсивності відбитого світлового потоку, зумовлене підвищенням концентрації хлорофілу a , може бути надійно зафіксоване лише за умови використання дистанційних систем із високою спектральною роздільною здатністю.

У практиці космічного дистанційного зондування найчастіше застосовуються багатозональні знімальні системи з порівняно широкими спектральними каналами. За такої спектральної роздільності ослаблення сигналу, викликане вибіркоvim поглинанням хлорофілом a , як правило, не реєструється безпосередньо. Збільшення концентрації фітопланктону, подібно до випадку неорганічних завислих речовин, призводить до зростання коефіцієнта дифузного відбиття.

У водних середовищах з низьким вмістом завислих частинок і розчиненої забарвленої органіки показник ослаблення світла визначається переважно коефіцієнтом поглинання чистої води. За таких умов глибина шару, що формує відбитий світловий потік, в оптичній та ближній інфрачервоній ділянках спектра зменшується зі зростанням довжини хвилі. Якщо глибина водного об'єкта є меншою за товщину цього ефективного шару, інтенсивність відбитого випромінювання залежить також від глибини залягання дна та його відбивних властивостей.

Наявність вертикального градієнта концентрації завислих речовин у водній товщі призводить до зміни коефіцієнта дифузного відбиття: у разі зростання концентрації з глибиною значення КДВ збільшується, а за зменшення концентрації — знижується. Інтенсивність цих змін зростає зі збільшенням величини градієнта та за умови його близького розташування до водної поверхні.

Так, характеристики світлового потоку, відбитого від водної поверхні, визначаються сукупною дією кількох чинників, серед яких ключову роль відіграють наявність і товщина нафтових плівок, інші поверхневі утворення (піна, біологічні плівки), концентрація завислих речовин і розчиненої забарвленої органіки, їх вертикальний розподіл у водній товщі, а також співвідношення між органічною та неорганічною фракціями завислих частинок.

Інфрачервоний діапазон

Характер впливу хвильових процесів на відбивні властивості водної поверхні в інфрачервоному діапазоні істотно залежить від геометрії спостереження. За малих кутів зенітного спостереження зростання інтен-

сивності хвилювання, як правило, супроводжується збільшенням коефіцієнта відбиття, натомість коефіцієнт випромінювання водної поверхні відповідно зменшується. За великих кутів спостереження реєструється протилежна тенденція, зумовлена зміною ефективної орієнтації мікрофасетів хвильової поверхні відносно напрямку реєстрації випромінювання.

Термодинамічна температура приповерхневого шару води є визначальним чинником формування випромінювальних характеристик акваторії в інфрачервоному діапазоні. Спектральна залежність інтенсивності теплового випромінювання водної поверхні описана законом Планка, що лежить в основі методів визначення температури поверхні моря та внутрішніх водойм за даними інфрачервоної радіометрії. Саме ця фізична закономірність забезпечує можливість дистанційного вимірювання температури поверхневого шару води з космічних платформ.

Водночас під час інтерпретації даних ІЧ-радіометрії необхідно враховувати низку факторів, які ускладнюють безпосереднє відновлення термодинамічної температури. По-перше, яскравісна температура, що реєструється сенсорами, залежить не лише від власне температури води, а й від величини коефіцієнта випромінювання поверхні. По-друге, теплове випромінювання формується у надзвичайно тонкому приповерхневому шарі води, товщина якого зазвичай не перевищує кількох сотих міліметра. Температура цього шару може суттєво відрізнятися від температури глибших шарів водної товщі внаслідок теплового обміну з атмосферою та випаровування.

Вплив термодинамічної температури на відбивні властивості водної поверхні в інфрачервоному діапазоні є значно менш вираженим порівняно з її впливом на випромінювальні характеристики. У спектральному інтервалі приблизно 3—11 мкм максимальні значення коефіцієнта відбиття води спостерігаються поблизу температури 20 °С. За відхилення температури як у бік зниження, так і в бік підвищення від цього значення фіксується незначне зменшення відбивної здатності.

Ступінь температурної чутливості коефіцієнта відбиття залежить також від довжини хвилі. Так, у довгохвильовій області інфрачервоного спектра (наприклад, поблизу 10,6 мкм) зміни відбивних характеристик є більш помітними, ніж у короткохвильовій ІЧ-області (близько 3,39 мкм). Зазначені особливості необхідно враховувати при аналізі супутникових інфрачервоних даних, особливо у задачах оцінювання температурних аномалій та теплового впливу на морські і прибережні акваторії.

Попри те, що товщина водного шару, в якому формується інфрачервоне випромінювання, відбите від водної поверхні, є надзвичайно малою, впливом складу водного середовища на інтенсивність цього випромінювання не можна повністю знехтувати. Експериментальні дослідження свідчать про наявність стійкої негативної кореляції між коефіцієнтом

випромінювання в інфрачервоному діапазоні та навіть відносно невисокими концентраціями завислих речовин (менше приблизно 1,1 мг/л), що вказує на чутливість ІЧ-сигналу до тонких змін оптичних властивостей приповерхневого шару води.

Отже, інтенсивність інфрачервоного випромінювання, що відбивається водним середовищем, визначається сукупною дією низки факторів, серед яких ключову роль відіграють наявність і товщина поверхневих плівок, рівень хвилювання, утворення піни, присутність інших поверхневих неоднорідностей, а також солоність води. Власне теплове випромінювання водного середовища, окрім зазначених чинників, визначається передусім термодинамічною температурою надзвичайно тонкого приповерхневого шару.

Високі значення спектрального коефіцієнта поглинання чистої води в інфрачервоному діапазоні зумовлюють дуже малу глибину проникнення випромінювання під водну поверхню. Унаслідок цього як підповерхневий відбитий потік, так і власне теплове випромінювання води формуються у вузькому шарі завтовшки близько сотих часток міліметра. Тоді будь-які зміни фізичних або хімічних властивостей поверхні істотно впливають на зареєстрований ІЧ-сигнал.

Механізм впливу поверхневих плівкових утворень на коефіцієнт дзеркального відбиття в інфрачервоному діапазоні за своєю природою є подібним до відповідних процесів в оптичній області спектра. Зокрема, коефіцієнт дзеркального відбиття нафтових плівок у ІЧ-діапазоні перевищує відповідне значення для чистої води, унаслідок чого нафтові забруднення на зображеннях, отриманих методами активного інфрачервоного зондування, проявляються як світліші ділянки на тлі незабрудненої поверхні.

Яскравіший контраст між нафтовою плівкою та фоновною водою в інфрачервоному діапазоні, як правило, є вищим ніж в оптичному, що пояснюється нижчими значеннями коефіцієнта дзеркального відбиття чистої води в цій спектральній області. Це створює сприятливі умови для більш ефективної ідентифікації нафтових забруднень водної поверхні. Збільшення альbedo води за наявності нафтових плівок супроводжується зменшенням коефіцієнта випромінювання, що відкриває можливість виявлення поверхневих плівок і за даними пасивної інфрачервоної радіометрії.

Водночас слід враховувати, що поверхневі плівки впливають на інтенсивність власного теплового випромінювання водного середовища не лише через зміну коефіцієнта випромінювання. Додатковими механізмами є модифікація термодинамічної температури поверхні води внаслідок пригнічення випаровування, зміна ефективної теплопровідності приповерхневого шару, а також зменшення хвилювання під дією плівки. Комплексний аналіз зазначених процесів показує, що сумарна

зміна яскравісної температури, спричинена наявністю нафтової плівки, може мати додатний і від'ємний знак. Характер цієї зміни визначається метеорологічними умовами, товщиною плівки та тривалістю часу, що минув від моменту виливу. В більшості практичних ситуацій визначальним є ефект підвищення температури поверхневого шару води, зумовлений зменшенням інтенсивності випаровування під нафтовою плівкою.

Надвисокочастотний діапазон

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

$$\varepsilon_{\text{в}} = \varepsilon_{\text{в1}} + i\varepsilon_{\text{в2}}.$$

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:

$$\varepsilon_{\text{в1}} = \varepsilon_s + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2}, \quad \varepsilon_{\text{в2}} = \frac{\lambda_s}{\lambda} \cdot \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\lambda_s}{\lambda}\right)^2} + \frac{\sigma_i \lambda}{2\pi c},$$

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

Аналіз відповідних співвідношень свідчить, що солоність водного середовища має визначальний вплив насамперед на уявну складову комплексної діелектричної проникності, оскільки електропровідність води безпосередньо пов'язана з концентрацією іонів розчинених солей. Урахування залежностей параметрів ε_s , ε_0 та λ_0 від солоності показує, що значення уявної частини діелектричної проникності різко зростає зі збільшенням солоності лише в довгохвильовій області мікрохвильового спектра. При цьому характер зростання є близьким до лінійного як за солоністю, так і за довжиною хвилі електромагнітного випромінювання.

У короткохвильовій частині спектра, за умови $\lambda < \lambda_0$, вплив солоності на уявну складову діелектричної проникності є значно слабшим і може вважатись другорядним. Графічні залежності, що ілюструють зміну дійсної та уявної складових діелектричної проникності від температури,

солоності та довжини хвилі, демонструють характерні закономірності їх спектральної поведінки.

Для чистої води дійсна частина діелектричної проникності зменшується монотонно зі скороченням довжини хвилі, натомість уявна складова має виражений максимум за довжини хвилі, що відповідає характерному значенню λ_0 . Величина цього параметра істотно залежить від температури води і зменшується приблизно з 4 до 2 см у разі підвищення температури від 0 до 20 °C.

Окрім розглянутих чинників, на значення комплексної діелектричної проникності водного середовища впливають також поверхневі плівкові утворення та піна. Діелектричні властивості піни визначаються співвідношенням водної та повітряної фаз, причому ефективна діелектрична проникність піни є обернено пропорційною концентрації повітряних включень. Тоді спектральна поведінка діелектричної проникності піни зберігає характер, подібний до спектральної залежності для води.

Загалом уявна частина комплексної діелектричної проникності демонструє тенденцію до зростання зі збільшенням довжини хвилі, що має принципове значення для інтерпретації даних надвисокочастотного дистанційного зондування морських і прибережних акваторій.

Випромінювальні та відбивні характеристики підстильних поверхонь визначаються не лише їхніми діелектричними властивостями, але й морфологією поверхні. Для водних акваторій це означає істотну залежність електромагнітної відповіді від параметрів хвильового поля, зокрема від інтенсивності та спектрального складу поверхневих хвиль. Унаслідок цього як ефективна площа розсіювання, так і випромінювальна здатність водної поверхні формуються під впливом факторів, що визначають характер хвилювання.

Серед таких факторів провідну роль відіграють швидкість вітру та наявність поверхневих плівкових утворень. Зі зростанням швидкості вітру посилюється дрібномасштабна складова хвильового спектра, що призводить до збільшення ефективної площі розсіювання за кутів спостереження, більших за приблизно 10°. Найпомітніше цей ефект проявляється за кутів понад 30°, коли внесок дрібних хвиль у формування радіолокаційного сигналу стає визначальним.

Наявність нафтової плівки на поверхні води, навпаки, призводить до пригнічення короткохвильових компонентів хвильового поля. Внаслідок цього ефективна площа розсіювання зменшується за великих кутів спостереження (понад 30°) і водночас зростає в області квазідзеркального відбиття. Додатковий вплив на хвильову структуру водної поверхні може чинити також рельєф дна. Цей вплив проявляється у просторовій модуляції ефективної площі розсіювання, величина якої обернено пропорційна квадрату глибини акваторії.

Загалом вплив хвильових процесів на значення ефективної площі розсіювання є значно сильнішим ніж вплив власне діелектричних характеристик водного середовища. Тому у разі активної радіолокації вплив нафтових плівок на зареєстрований сигнал реалізується переважно непрямым шляхом — через зміну спектра та інтенсивності поверхневого хвилювання.

Аналіз впливу нафтових плівок на радіояскравісну температуру вимагає врахування інтерференційних ефектів, унаслідок яких величина радіояскравісного контрасту залежить від відношення товщини плівки до довжини хвилі випромінювання. Максимальні значення контрасту, які можуть сягати 80 К, спостерігаються за умови, коли це співвідношення становить близько 0,15. У разі тривалого перебування нафтової плівки на водній поверхні (понад одну добу) залежність радіояскравісної температури від товщини плівки слабшає, що пов'язано з її поступовою трансформацією у водонафтову емульсію.

Збільшення швидкості вітру спричинює зростання радіояскравісної температури як унаслідок зміни спектра хвильового поля, так і через інтенсивніше утворення піни. У діапазоні швидкостей вітру від 0 до приблизно 10 м/с підвищення радіояскравісної температури може становити близько 10 К. Вплив солоності на величини ефективної площі розсіювання та радіояскравісної температури є відносно слабшим і стає помітнішим переважно у довгохвильовій частині мікрохвильового спектра (за довжин хвиль понад 30 см). Зі збільшенням солоності, як правило, спостерігається тенденція до зменшення ефективної площі розсіювання та одночасного зростання радіояскравісної температури.

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.

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

У разі активного зондування морських акваторій у надвисокочастотному діапазоні переважний вплив на інтенсивність зареєстрованого сигналу мають фактори, що зумовлюють зміну параметрів поверхневого хвилювання. До них насамперед належать швидкість вітру, наявність та характеристики поверхневих плівкових утворень, а також особливості донної топографії, що опосередковано модулюють хвильове поле. Вплив

термодинамічної температури та солоності води на величину сигналу в цьому разі є значно слабшим і зазвичай відіграє другорядну роль.

Водночас роль солоності стає помітнішою у довгохвильовій області мікрохвильового спектра, де її внесок у формування електромагнітної відповіді водної поверхні зростає. Для пасивних методів надвисокочастотного зондування визначальним параметром є радіояскравісна температура, величина якої передусім залежить від термодинамічної температури приповерхневого шару води та солоності. Суттєвий вплив також чинять поверхневі плівкові утворення, причому радіояскравісна температура є чутливою до товщини плівок за умови, що вони ще не зазнали емульгування.

Крім зазначених чинників, на величину радіояскравісної температури впливають параметри хвилювання водної поверхні, утворення піни та інші метеорологічні й гідрофізичні умови. Сукупна дія цих факторів зумовлює складний характер формування сигналу пасивного мікрохвильового зондування, що необхідно враховувати під час інтерпретації даних дистанційного моніторингу морських і прибережних акваторій.

2.4. Інформаційні технології обробки супутникових знімків

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, сенсорам високої роздільної здатності та потужним інструментам цифрової обробки даних відбувається трансформація уявлень про просторово-часовий аналіз територій.

Оброблення супутникових знімків — це багаторівневий процес, який охоплює етапи передоброблення, тематичної інтерпретації, класифікації, візуалізації, збереження та інтеграції даних у геоінформаційні системи. Сучасні інформаційні технології дають змогу реалізувати цей цикл із мінімальним втручанням людини завдяки використанню алгоритмів штучного інтелекту, глибокого навчання, хмарних обчислень та спеціалізованих геопросторових платформ.

Передоброблення супутникових зображень. Першим і обов'язковим етапом є геометрична та радіометрична корекція знімків. Геометрична корекція усуває просторові викривлення, що виникають

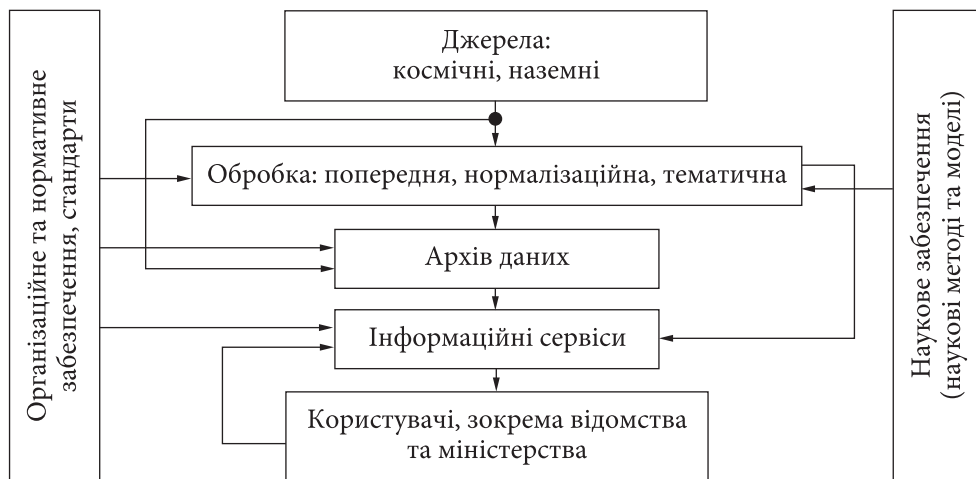


Рис. 2.2. Структура використання даних ДЗЗ

Джерело: адаптовано за [46].

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 завдань широко застосовують автоматизовані інструменти, реалізовані у програмних платформах *ENVI*, *ERDAS Imagine*, *QGIS*, *ArcGIS Pro*, а також хмарних середовищах, зокрема *Google Earth Engine (GEE)* та *ESA SNAP*.

На сьогоднішній день прийом, оброблення, аналіз, архівація та видача користувачам інформації ДЗЗ з КА структурно можливо представити у вигляді схеми (рис. 2.2).

Оброблення даних ДЗЗ, відповідно до світової практики, має на меті декілька станів оброблення [46, 52]:

- первинні дані, доповнені орбітальною інформацією;
- радіометрично відкоректовані і географічно прив'язані зображення;
- перетворені в задану картографічну проекцію зображення з урахуванням координат опорних точок;
- геометрично перетворені зображення з урахуванням цифрової моделі місцевості (для суходолу);
- мультиспектрально оброблені, що включає спільну обробку різночасових даних або даних, отриманих з різних датчиків.

Аналіз представлених принципів оброблення даних ДЗЗ, а також використання системи термінів, створеної В.І. Лялько та М.О. Поповим, дозволили визначити і представити такі функції оброблення даних ДЗЗ, необхідних для визначення показників температурних явищ (табл. 6.1).

Зазвичай отримані дані мають рівень оброблення 1В, 2А (географічно прив'язане зображення по орбітальним даним). Подальше їх використання для автоматизованого розпізнавання кораблів на водній поверхні потребує здійснення попередньої обробки, а саме: нормалізації, точної географічної прив'язки та перетворення у синтезоване багатоспектральне зображення (*Pan Sharpening*) [46, 48, 52].

Важливим елементом нормалізації даних є вирівнювання яскравості та атмосферна корекція, адже зйомка здійснюється в різних умовах: освітленості, кута знімання, погодних умов [52].

Таблиця 6.1. Функції оброблення даних ДЗЗ

№ рівня	Функція
0	Прийом даних ДЗЗ Попереднє оброблення знімка (залежно від формату даних зображення)
1	Нормалізація даних
1А	Радіометрична корекція Спектральне покращення зображення Атмосферна корекція
1В	Геометрична корекція Геокодування
2А	Перетворення у задану картографічну проєкцію Трансформування знімка
2В	Повна географічна прив'язка з використанням наземних точок
3	Дешифрування загального характеру Просторова фільтрація Повна географічна прив'язка з врахуванням цифрової моделі рельєфу (ЦМР) місцевості (ортотрансформування)
4	Тематичне оброблення даних Розпізнавання образів Класифікація даних Інтерпретація даних ДЗЗ Пряме дешифрування Індикаційне дешифрування Розрахунок температурних показників Автоматизоване дешифрування Векторизація даних

Джерело: складено автором за [52].

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 дають змогу 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.

Класифікація та тематичне дешифрування. Тематичний аналіз здійснюється за допомогою класифікації пікселів — супутникові зображення перетворюються на тематичні карти. Застосовуються як методи машинного навчання (*Random Forest, SVM, Decision Tree*), так і алгоритми глибокого навчання (*Convolutional Neural Networks — CNN*), що дають змогу 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.

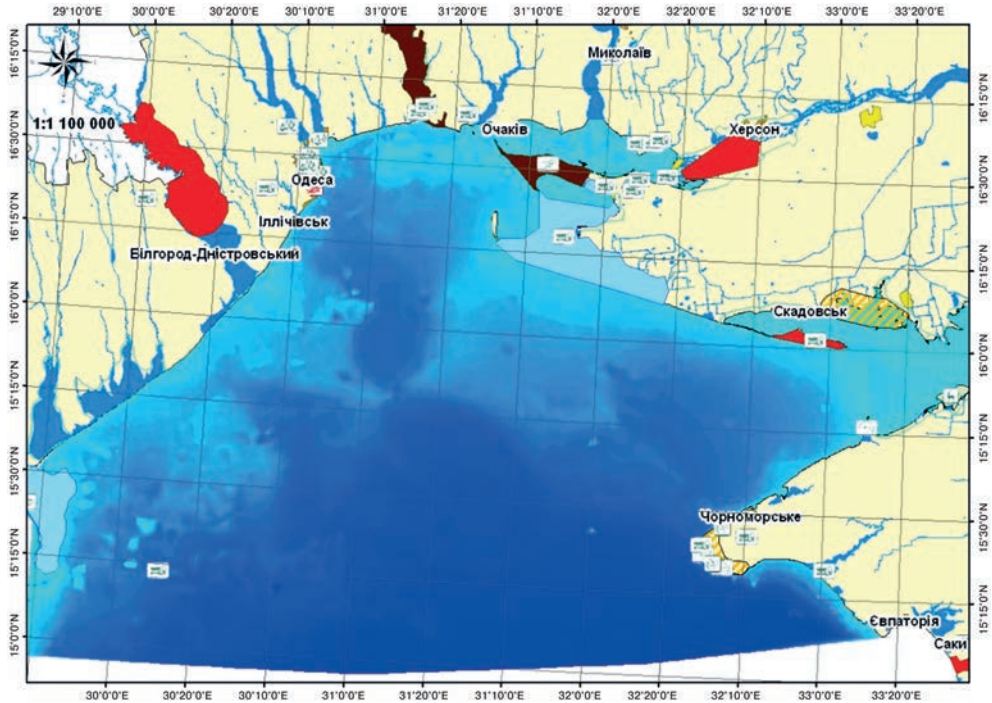
У контексті воєнного часу тематичне дешифрування застосовується для виявлення наслідків обстрілів, змін лінії фронту, зруйнованих об'єктів критичної інфраструктури і навіть замаскованих споруд.

Хмарні геоінформаційні системи та інтеграція з ГІС

Завдяки розвитку хмарних обчислювальних технологій обробка великих обсягів супутникових даних стала доступною не лише для спеціалізованих наукових установ, а й для широкого кола дослідників та управлінців. Сучасні платформи, зокрема *Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, PlanetScope, NASA Worldview, Amazon Open Data*, забезпечують безкоштовний або умовно відкритий доступ до архівів супутникових знімків місій *Sentinel, Landsat, MODIS, VIIRS* та інших, а також надають інструменти для їх обробки, аналізу й візуалізації без необхідності локального завантаження даних.

Ключовою перевагою сучасних інформаційних технологій є їх тісна інтеграція з геоінформаційними системами. Супутникові дані можуть поєднуватися з векторними шарами, тематичними базами даних, картами ризиків та цифровими моделями територій. Це створює передумови для побудови цифрових моделей рельєфу (*DEM*), карт оцінки рівня забруднення, прогнозних моделей затоплення й ерозійних процесів, а також для розрахунку площ ураження та аналізу сценаріїв розвитку екологічних загроз.

Окрему нішу займають галузеві інформаційні системи, орієнтовані на вирішення спеціалізованих завдань:



Умовні позначення

Причорноморські міста

Природно-заповідний фонд

- Ботанічний сад
- Біосферний заповідник
- Заказник
- Заповідне урочище
- Заповідник
- Ландшафтний парк
- Пам'ятка природи
- Парк
- Прибережний аквальний комплекс

Заповідники

- Біосферний заповідник
- Заказник
- Заповідник
- Ландшафтний парк
- Національний природний парк
- Резерв
- Рамсарські ветланди

Рис. 2.3. Карта природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод Північно-західної частини Чорного моря

Джерело: наведено за [52].

- системи екологічного моніторингу (*EcoMonitoring GIS*);
- платформи управління природоохоронними територіями (*Protected Areas Monitoring*);
- геоінформаційні системи безпеки та оборони (*GeoIntelligence Platforms*);
- системи управління надзвичайними ситуаціями (*Disaster Monitoring Information Systems*).

Такі платформи поєднують аналітичні модулі, інтерактивні інтерфейси візуалізації, просторові бази даних і засоби автоматизованої оцінки

ризиків, що дає змогу формувати цілісну картину природних і техногенних загроз у прибережних та морських регіонах. На рис. 2.3 наведено приклад інтерактивної карти природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод північно-західної частини Чорного моря.

Попри суттєві досягнення, технології обробки супутникових знімків стикаються з низкою викликів, зокрема з необхідністю високоякісної інтерпретації даних, впливом хмарності на оптичні знімки, складністю автоматичної класифікації в умовах змішаних пікселів, а також із підвищеними вимогами до обчислювальних ресурсів під час роботи з гіперспектральними даними.

Водночас у найближчій перспективі прогнозується подальше зростання ролі штучного інтелекту, інтернету речей (*IoT*), глобальних моделей прогнозування та підвищення просторової, спектральної й часової роздільної здатності супутникових систем, зокрема завдяки використанню мікросупутників і радіолокаційних платформ SAR.

Отже, інформаційні технології обробки супутникових знімків є потужним інструментом аналізу в реальному часі, що забезпечує підтримку ухвалення рішень у сферах екологічної безпеки, оборони, управління природними ресурсами та реагування на надзвичайні ситуації. Їх впровадження є критично важливим для повоєнного відновлення України, адаптації до кліматичних змін і подальшої цифрової трансформації суспільства.

Висновок

Вдосконалено інформаційно-технологічний аспект космічного моніторингу морських акваторій та прибережних зон, що є ключовим для ефективного аналізу екологічного стану прибережних територій і водних ресурсів. Показано, що використання сучасних інформаційних платформ (*Google Earth Engine, Copernicus Open Access Hub, Sentinel Hub, Maxar SecureWatch*) забезпечує доступ до актуальних, точних і верифікованих супутникових даних, необхідних для екологічного моніторингу, управління природними ресурсами, виявлення змін у довкіллі та оперативного реагування на надзвичайні ситуації. На основі інтеграції супутникових даних у геоінформаційні системи сформовано ефективні моделі оцінювання екологічних ризиків і прогнозування змін, а також побудовано тематичні карти забруднення, зокрема шляхом виявлення нафтових плям, аналізу концентрації хлорофілу та визначення межі «вода — суходіл».

Доведено ефективність використання сучасних супутникових сенсорів для отримання високоточних даних, необхідних для картографування берегової лінії, оцінки стану фітопланктону, виявлення процесів вертикального та горизонтального змішування водних мас, а ще аналізу

впливу глобальних кліматичних змін на морські екосистеми. Це забезпечує можливість оперативного виявлення змін, спричинених як антропогенними чинниками, так і природними процесами, та створює передумови для прогнозування потенційних екологічних криз і катастроф. Обґрунтовано значущість використання різних спектральних діапазонів для аналізу водного середовища, що дає змогу детально досліджувати рівень забруднення морських вод, процеси евтрофікації, зміну прибережних ландшафтів і вплив кліматичних факторів. Показано, що комплексне використання видимого, інфрачервоного, теплового та радіолокаційного діапазонів істотно підвищує інформативність дистанційного моніторингу морських акваторій.

Проаналізовано доцільність застосування методів машинного навчання та штучного інтелекту в обробленні супутникових знімків, що дало змогу підвищити точність і швидкість моніторингу морських акваторій та прибережних зон у середньому на 16 %. Використання алгоритмів автоматичної класифікації, сегментації та виявлення змін забезпечує створення високоточних тематичних карт і аналітичних продуктів, необхідних для підтримки стратегічних управлінських рішень у сфері екологічної безпеки. Визначено особливу роль інформаційних технологій космічного моніторингу для України в умовах повоєнного відновлення. Супутникові платформи надають можливість не лише оцінювати масштаби руйнувань і картографувати постраждалі території, а й здійснювати системний моніторинг природних ресурсів, виявляти осередки забруднення та підтримувати міжнародні гуманітарні ініціативи.

Доведено, що інтегроване використання оптичних, теплових і радіолокаційних сенсорів дає змогу сформувати комплексне уявлення про стан морських акваторій і прибережних зон. Ефективна інтеграція даних з різних супутникових платформ у ГІС-середовищах із застосуванням автоматизованої обробки та аналітики забезпечує оптимізацію природоохоронних, управлінських і оборонних рішень. В умовах кліматичних змін, воєнних дій і деградації прибережних екосистем супутниковий екологічний моніторинг набуває стратегічного значення для сталого управління морським середовищем. Сучасна екологічна ситуація в українській частині Чорного моря потребує реалізації як оперативних, так і довгострокових заходів, а ефективний контроль морських акваторій стає не лише складовою сталого розвитку, а й елементом національної безпеки.



У цьому розділі представлено результати експериментального дослідження точності автоматизованого розпізнавання об'єктів і аномалій на аерокосмічних знімках із використанням сучасних інформаційних технологій та методів глибокого навчання. Основна увага зосереджена на розробленні та оцінюванні підходів до автоматизованої ідентифікації екологічно небезпечних об'єктів і зон антропогенного забруднення в акваторії Чорного моря.

У межах дослідження проведено порівняльний аналіз ефективності нейромережових архітектур *YOLOv5*, *U-Net* та *DeepLabv3+*, які застосовувалися для вирішення завдань сегментації плям забруднення, виявлення змін берегової лінії та класифікації техногенних аномалій. Аналіз виконано з урахуванням особливостей морського середовища, складності спектральних характеристик водної поверхні та просторово-часової мінливості екологічних процесів.

Експериментальні дослідження базувалися на багаторічних супутникових архівах дистанційного зондування Землі з високим просторовим розрізненням, що охоплюють різні сезони та гідрометеорологічні умови. Навчання моделей здійснювалося на анотованих вибірках, сформованих для типових сценаріїв екологічного забруднення, зокрема нафтопродуктами, зваженими речовинами, зонами замулення та іншими антропогенними впливами. У результаті встановлено, що використання спеціалізованих архітектур глибокого навчання дає змогу підвищити точність дешифрування до 92,4 % і суттєво скоротити час попередньої обробки та аналізу супутникових даних.

У розділі також обґрунтовано вибір оптимальних структурних і гіперпараметрів моделей, розглянуто методи підвищення їхньої стійкості до шумів, атмосферних спотворень і сезонних змін, а ще — підходи до зниження рівня

хибнопозитивних спрацювань. Результати роботи нейромереж інтегровано в геоінформаційне середовище, спроможне сформувати просторово-часові картограми екологічного стану акваторії, придатні для використання в рамках єдиної інформаційно-аналітичної системи моніторингу морського середовища.

Практичне застосування запропонованих підходів створює нові можливості для комплексної оцінки антропогенного навантаження, раннього виявлення екологічних загроз і оперативного реагування на надзвичайні ситуації в морському середовищі, що є особливо актуальним в умовах зростання екологічних ризиків і воєнних викликів у прибережних регіонах України.

3.1. Інформаційні технології для оцінки екологічного стану морських акваторій

Технології обробки даних космічного моніторингу водних акваторій у програмно-технологічному комплексі

Сучасні екологічні виклики, зокрема зростання антропогенного навантаження на прибережні зони та морські екосистеми, потребують застосування високотехнологічних інтегрованих рішень для моніторингу, аналізу та прогнозування стану морського середовища. Особливе місце серед таких рішень посідають інформаційні технології, що поєднують методи дистанційного зондування Землі, геоінформаційні системи, штучний інтелект, елементи Інтернету речей, супутниковий моніторинг і чисельне моделювання природних процесів.

У межах дослідження обробка даних космічного моніторингу реалізується в рамках програмно-технологічного комплексу, який є багаторівневою інформаційно-аналітичною системою, призначеною для автоматизованого збирання, передоброблення, аналізу, інтерпретації та візуалізації супутникових даних про стан морських акваторій. Такий комплекс забезпечує систематичне, об'єктивне та масштабне спостереження за динамікою екологічних параметрів у просторово-часовому вимірі.

Архітектурно програмно-технологічний комплекс складається з кількох функціональних рівнів.

1) Рівень збирання та інтеграції даних. На цьому етапі здійснюється отримання супутникових знімків із відкритих та комерційних платформ (*Copernicus Open Access Hub*, *Google Earth Engine*, *USGS EarthExplorer*, *Sentinel Hub*, *Maxar*), а також інтеграція допоміжної інформації: метеорологічних даних, океанографічних вимірювань, результатів *in situ* спостережень та даних автоматизованих сенсорних мереж. Забезпечується уніфікація форматів, геоприв'язка та синхронізація даних у часовому аспекті.

2) Рівень передоброблення супутникових зображень. Етап охоплює радіометричну та атмосферну корекцію, фільтрацію шумів, маскування хмарності, нормалізацію спектральних значень і приведення знімків до єдиного просторового масштабу. Для цього використовують класичні алгоритми оброблення зображень і спеціалізовані бібліотеки (*SNAP*, *GDAL*, *Rasterio*, *OpenCV*), а також хмарні інструменти обчислень.

3) Аналітичний рівень та модулі інтелектуальної обробки. На цьому рівні реалізується тематичний аналіз даних із використанням алгоритмів машинного навчання та глибоких нейронних мереж. У програмно-технологічному комплексі застосовують моделі сегментації та детекції (*YOLOv5*, *U-Net*, *DeepLabv3+*), що дають змогу автоматично ідентифікувати плями нафтового забруднення, зони підвищеної каламутності, області евтрофікації, зміни берегової лінії та інші екологічно небезпечні аномалії. Додатково використовують спектральні індекси (*NDWI*, *NDCI*, *FAI*, *SST*-індекси), що підвищують інформативність аналізу та забезпечують фізичну інтерпретованість результатів.

4) Геоінформаційний та візуалізаційний рівень. Результати автоматизованої обробки інтегруються у ГІС-середовище (*QGIS*, *ArcGIS*, *Web-GIS*), де формуються тематичні карти, просторово-часові картограми, шари ризиків та аналітичні звіти. Це дає змогу здійснювати комплексну оцінку екологічного стану акваторій, аналіз динаміки змін та підтримку ухвалення управлінських рішень.

5) Рівень зберігання та управління даними. Програмно-технологічний комплекс передбачає використання баз геопросторових даних і хмарних сховищ, що забезпечують архівацію супутникових матеріалів, результатів аналізу та метаданих із можливістю масштабування і спільного доступу для різних груп користувачів.

Застосування такого програмно-технологічного комплексу дає змогу переходити від фрагментарного аналізу окремих знімків до системного моніторингу морських акваторій, орієнтованого на раннє виявлення екологічних загроз, оцінку антропогенного навантаження та прогнозування розвитку небезпечних процесів. Особливої актуальності це набуває для Чорноморського регіону України в умовах воєнних дій, пошкодження інфраструктури та зростання ризиків техногенного забруднення.

Вагомим структурним елементом сучасної інформаційної інфраструктури моніторингу морського середовища є геоінформаційні системи. Вони забезпечують інтеграцію просторових і атрибутивних даних, аналітичну обробку багатовимірної інформації, автоматизоване формування тематичних карт, моделювання просторово-часової динаміки природних процесів, а також побудову карт зон екологічного ризику. Використання ГІС-технологій створює можливість комплексного синтезу даних, що надходять із різномірних джерел, зокрема супутникових систем спо-

стерезення, безпілотних літальних апаратів, наземних вимірювальних комплексів, гідрологічних постів та мереж *IoT*-сенсорів. На основі геоінформаційного аналізу здійснюють локалізацію потенційних осередків забруднення, оцінювання просторового поширення екологічних порушень і побудову прогностичних моделей трансформації морських акваторій.

У країнах із високим рівнем технологічного розвитку дедалі ширше впроваджуються інтелектуальні аналітичні системи, що базуються на методах машинного навчання (*ML*) та глибокого навчання (*DL*). Такі системи забезпечують автоматизоване виявлення характерних ознак забруднення, класифікацію типів екологічних порушень (зокрема нафтових плівок, масового цвітіння водоростей, аномальних змін оптичних характеристик води), а також прогнозування їх подальшого розвитку. Завдяки здатності самостійно ідентифікувати приховані закономірності у великих масивах супутникових та допоміжних даних, алгоритми штучного інтелекту істотно підвищують обґрунтованість і оперативність управлінських рішень. На практиці ШІ активно використовується для класифікації супутникових зображень, автоматичної сегментації берегової лінії, виявлення об'єктів забруднення та прогнозування сезонних змін гідрохімічних параметрів морського середовища.

Додатковий рівень деталізації екологічних спостережень забезпечує Інтернет речей, який принципово розширює можливості польових досліджень. Автономні сенсорні системи, розміщені безпосередньо у водному середовищі або на плавучих платформах, дають змогу у режимі реального часу реєструвати показники *pH*, концентрацію розчиненого кисню, солоність, вміст нітратів і фосфатів, температуру води, а також параметри, пов'язані з мікропластиком. Інформація з таких сенсорів передається через бездротові канали зв'язку до серверних центрів, де здійснюється її аналітичне оброблення, інтеграція з супутниковими даними та включення до ГІС-моделей. Формування подібних гібридних систем моніторингу дає змогу отримувати високодеталізовану картину екологічних змін як у масштабі окремих точок спостереження, так і на рівні локальних та регіональних морських акваторій.

Вагомим складником сучасних інформаційно-аналітичних систем екологічного моніторингу є математичне моделювання, яке забезпечує не лише оцінювання поточного стану морських акваторій, а й формування науково обґрунтованих прогнозів їх подальшої трансформації. Гідродинамічні моделі, зокрема *Delft3D*, *ROMS*, *MIKE 21*, а також спеціалізовані моделі переносу та розповсюдження забруднювальних речовин (*GNOME*, *SWAN*), широко застосовують для аналізу поширення нафтопродуктів, моделювання морських течій, просторового розподілу температури й солоності, для дослідження поведінки домішок у водному середовищі. У поєднанні з даними дистанційного зондування Землі та результатами польових вимірювань такі моделі створюють основу для глибокого системного аналізу та сценарного моделювання впливу різноманітних чинни-



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

Джерело: наведено за [47, 50].

ків — від аварійних розливів нафти до довготривалих процесів деградації морських екосистем і зниження біорізноманіття.

Науково-практичний інтерес становлять технології обробки гіперспектральних зображень, що забезпечують високоточну ідентифікацію спектральних підписів хімічних сполук, органічних забруднень, водоростей і важких металів. Активний розвиток таких технологій відбувається в межах сучасних супутникових місій (*PRISMA*, *EnMAP*), а ще на базі безпілотних літальних апаратів, оснащених гіперспектральними сенсорами. Це відкриває принципово нові можливості для детального аналізу складу водного середовища, дослідження процесів евтрофікації та оцінювання впливу нафтогазовидобувної діяльності на прибережні екосистеми.

Інноваційним напрямом, що активно інтегрується у практику морського екологічного моніторингу, є розроблення веборієнтованих ГІС-порталів і цифрових аналітичних платформ, призначених для інтерактивного аналізу та візуалізації екологічних даних. У межах таких систем реалізується можливість динамічного перегляду супутникових знімків, побудови просторово-часових графіків, виконання запитів до гео-

просторових баз даних, а також оцінювання індексів екологічного ризику. Це не лише підвищує прозорість процесів екологічного управління, але й значно розширює доступ наукової спільноти та громадськості до актуальної інформації про стан морського середовища.

Практична ефективність зазначених технологічних підходів може бути проілюстрована на прикладі моніторингу шельфових зон Чорного та Азовського морів. Зокрема, в районах інтенсивного судноплавства та видобутку вуглеводнів інформаційні технології дають змогу фіксувати навіть незначні прояви забруднення, пов'язані з витоками нафтопродуктів, техногенними аваріями або перевантаженням транспортної інфраструктури. Застосування аналітичних індексів — *NDWI*, *NDCI*, *FAI*, *TSM* — забезпечує автоматизований моніторинг каламутності води, продуктивності фітопланктону, температурних характеристик і вмісту органічних домішок. Приклади шарів інтерактивних карт природних і техногенних чинників забруднення територіальних вод північно-західної частини Чорного моря наведено на рис. 3.1.

Отже, інтегроване застосування сучасних інформаційних технологій забезпечує перехід до принципово нового рівня оцінювання екологічного стану морських акваторій. Поєднання супутникового моніторингу, геоінформаційних систем, методів штучного інтелекту, математичного моделювання та сенсорних мереж формує надійну науково-технологічну основу для комплексного аналізу природних і техногенних процесів у морському середовищі. Ефективне впровадження таких підходів створює передумови для сталого розвитку морських регіонів, збереження біорізноманіття, підвищення рівня екологічної та техногенної безпеки водокористування, а також для своєчасного реагування на надзвичайні екологічні ситуації.

У довгостроковій перспективі зазначені інформаційні технології мають стати невід'ємною складовою державної системи екологічного моніторингу, інструментом підтримки ухвалення управлінських рішень у сфері охорони морського довкілля та важливим елементом забезпечення національної екологічної безпеки, особливо в умовах кліматичних змін і зростання антропогенного навантаження.

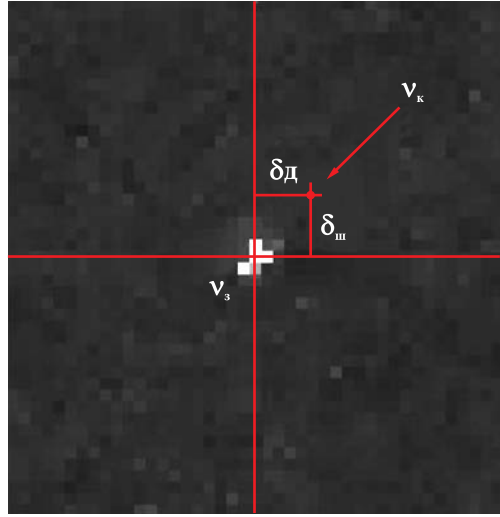


Рис. 3.2. Визначення похибки координатного прив'язування
Джерело: розроблено за [38].

Аналіз точності визначення географічних координат надводних об'єктів за даними космічної зйомки здійснюється в такому порядку:

1. Визначення похибки (рис. 3.2) координатного прив'язування окремо по широті та довготі здійснюється за формулою:

$$\delta = v_3 - v_\kappa, \quad (3.1)$$

де v_3 — широта або довгота контрольної точки знімка; v_κ — широта або довгота відповідної контрольної точки цифрової карти.

2. Розрахунок середнього значення похибки:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i}{n}, \quad (3.2)$$

де n — кількість контрольних точок.

3. Розрахунок незміщеної оцінки похибки, що становить:

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i - \bar{\delta})^2}{n-1}. \quad (3.3)$$

4. Розрахунок середньоквадратичного відхилення дисперсії. При збільшенні n закон розподілу суми похибок наближається до нормального. Тоді середньоквадратичне відхилення дисперсії дорівнює:

$$\sigma_{\bar{D}} = \bar{D} \sqrt{\frac{2}{n-1}}. \quad (3.4)$$

5. Розрахунок верхньої межі довірчого інтервалу:

$$I = \bar{D} + t_\beta \sigma_{\bar{D}}, \quad (3.5)$$

де коефіцієнт t_β визначає для нормального закону розподілу число середніх квадратичних відхилень, які треба відкласти вправо від центру розсіювання для того, щоб вірогідність влучення випадкової величини в отриманому інтервалі дорівнювала β .

При визначенні похибки координатного прив'язування приймалося, що $\beta = 0,95$.

Результати розрахунків показали можливість визначення географічних координат об'єктів за даними надвисокої п.р. (менше 1 м) у межах 2—3 м.

За даними середньої та високої просторової розрізненості (від 1 до 10 м) — 5—100 м.

Оцінювання точності ідентифікації розпізнаних об'єктів проводиться з використанням теорії множин БД визначених об'єктів та кораблів по їх геометричним показникам (розміри, форма тощо).

Шар ідентифікованих об'єктів можна розглядати як певну множину M :

$$M = \{O, BS, P\}, \quad (3.6)$$

де O — множина розпізнаних об'єктів; BS — множина БД кораблів; P — ймовірність відповідності.

Проведемо порівняльний аналіз атрибутивних даних субмножин:

$$\begin{aligned} O &= \{\text{Number, Longitude, Latitude, X, Y, Lgth, Breadth, Direction}\} \\ BS &= \{\text{Number, Lgth, Breadth, Name, Base}\} \\ P &= \{\text{Number, type, \%}\}, \end{aligned} \quad (3.7)$$

де *type* — висока, середня, низька вірогідність; % — кількісний показник вірогідності.

В результаті проведеного аналізу було визначено необхідність формування множини даних відповідності розпізнаних об'єктів фактичним кораблями:

- об'єкти, що відносяться до кораблів з БД:

$$O \cap BS, \quad (3.8)$$

- об'єкти, що не відносяться до кораблів з БД:

$$O \notin BS. \quad (3.9)$$

Було розроблено та реалізовано алгоритм розрахунку імовірності ідентифікації кораблів (рис. 3.3).

Отже, застосування даних ДЗЗ з космосу уможливорює: підвищити імовірність визначення надводних об'єктів; включити в систему спостереження додаткові показники ефективності щодо визначення положення надводного об'єкта та імовірності його ідентифікації.

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

Автоматизація дешифрування та виявлення об'єктів морської інфраструктури

В умовах зростання екологічних ризиків, зумовлених воєнними діями, інтенсивним антропогенним навантаженням і кліматичними трансформаціями, особливої актуальності набуває використання знімків, отриманих за допомогою безпілотних літальних апаратів, для моніторингу морських акваторій та прибережних зон. Застосування БПЛА забезпечує оперативне

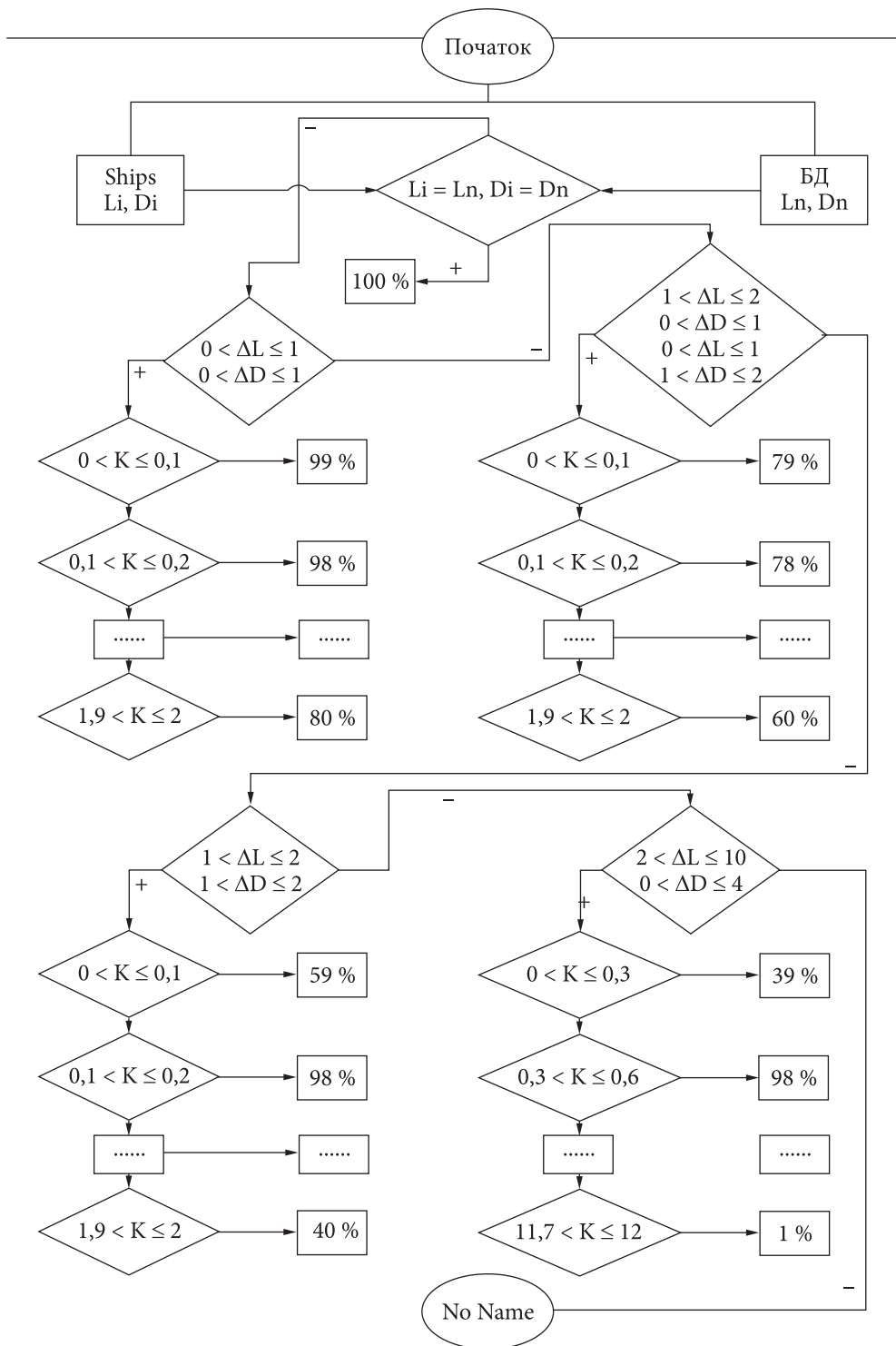


Рис. 3.3. Алгоритм розрахунку імовірності ідентифікації кораблів
 Джерело: розроблено за [38].

отримання зображень надвисокої просторової роздільної здатності, що дає змогу фіксувати дрібномасштабні зміни берегової лінії, прояви ерозійних процесів, локальні скупчення водоростей, нафтопродуктів, смітєві шлейфи, а також наслідки аварійних або несанкціонованих скидів забруднювальних речовин.

Водночас суттєвою науково-практичною проблемою залишається автоматизація процесів дешифрування аерофотознімків з метою ідентифікації об'єктів морської інфраструктури (ОМІ), зон техногенного впливу та біофізичних аномалій у водному середовищі. Традиційні методи, ґрунтовані на візуальній інтерпретації зображень оператором, є малоефективними в умовах великих обсягів даних, високої динаміки подій і необхідності оперативного реагування.

Для розв'язання цієї проблеми у межах дослідження запропоновано математичну модель автоматизованого дешифрування, яка базується на методах комп'ютерного зору та машинного навчання, зокрема на використанні нейронних мереж глибокого навчання (рис. 3.4). Цей підхід забезпечує автоматичне виявлення та локалізацію цільових об'єктів на аерофотознімках, отриманих над морськими акваторіями, з урахуванням складних умов спостереження: неоднорідності фону, змін освітлення, хвилювання водної поверхні та наявності завад.

Особливо перспективними в цьому контексті є згорткові нейронні мережі (*Convolutional Neural Networks*, CNN) та архітектури класу YOLOv5, які поєднують високу точність розпізнавання з можливістю обробки зображень у режимі, близькому до реального часу. Застосування таких моделей дає змогу ефективно ідентифікувати елементи портової та прибережної інфраструктури, судна, гідротехнічні споруди, а ще зони потенційного екологічного ризику навіть за обмежених обчислювальних ресурсів, що є критично важливим для практичних систем моніторингу [35].

Інструменти дешифрування аерофотознімків, отриманих із безпілотних літальних апаратів

В умовах зростання значущості екологічного моніторингу прибережних територій і морських акваторій, зумовленого інтенсифікацією техногенного навантаження, розвитком морського судноплавства та наслідками воєнних дій, актуалізується потреба у створенні ефективних автоматизованих інструментів дешифрування аерофотознімків, отриманих із безпілотних літальних апаратів. Поєднання даних БПЛА з інтелектуальними методами аналізу зображень дає змогу суттєво підвищити точність і оперативність виявлення ключових об'єктів морської інфраструктури, локалізації зон забруднення, фіксації змін берегової лінії, осередків евтрофікації та розливів нафтопродуктів.



Рис. 3.4. Блок-схема математичної моделі дешифрування аерофотознімків морських акваторій та прибережних зон

Джерело: адаптовано за [17].

У дослідженні реалізовано інструментальний підхід до автоматизованого дешифрування, який ґрунтується на багаторівневій обробці аерофотознімків морських і прибережних ділянок. Запропонована система інструментів ба-

зується на принципах комп'ютерного зору, машинного навчання та глибоких нейронних мереж і забезпечує автоматичне виявлення екологічно значущих об'єктів у складних умовах спостереження. Її застосування дає змогу мінімізувати часові затримки, характерні для традиційних методів ручної інтерпретації, та знизити суб'єктивність оцінювання результатів.

Функціонально інструменти дешифрування реалізують послідовність операцій, що включає попередню обробку зображень (нормалізацію, фільтрацію шумів, корекцію геометричних і радіометричних спотворень), автоматизовану сегментацію та детекцію об'єктів, а також їх класифікацію за заданими екологічними та інфраструктурними ознаками. Особливу роль у цьому процесі відіграють моделі глибокого навчання, що забезпечують стійкість алгоритмів до змін освітлення, хвилювання водної поверхні, неоднорідності фону та складних погодних умов.

Основною метою впровадження таких інструментів є забезпечення високої оперативності аналізу аерофотознімків за збереження необхідного рівня точності та достовірності результатів. Це має вирішальне значення в ситуаціях, що характеризуються швидкою динамікою екологічних процесів, зокрема під час аварійних скидів забруднювальних речовин, руйнування гідротехнічної інфраструктури або поширення біологічних загроз (масове цвітіння води, поява інвазійних видів тощо).

Отже, використання спеціалізованих інструментів автоматизованого дешифрування аерофотознімків із БПЛА формує технологічну основу для побудови сучасних систем екологічного моніторингу морських акваторій і прибережних зон, орієнтованих на оперативне виявлення небезпечних змін, підтримку ухвалення управлінських рішень та підвищення рівня екологічної безпеки.

Етапи моделювання векторизації контурів виділених ділянок

Побудова математичної моделі автоматизованого дешифрування аерофотознімків морських акваторій і прибережних зон включає три логічно послідовні етапи, що забезпечують формування, навчання та валідацію інтелектуальної системи розпізнавання об'єктів (рис. 3.5).

Етап 1. Формування навчальної вибірки. На першому етапі здійснюється збирання та систематизація репрезентативного набору аерофотознімків, що містять приклади типових прибережних об'єктів та зон забруднення. До класів об'єктів належать берегові укріплення, дамби, пляжі, гирла річок, портові споруди, риболовецька інфраструктура, а також зони техногенного й природного походження, зокрема нафтові плівки, плями скидів стічних вод, ділянки замулення та шлейфи зважених речовин.

Для формування навчальної вибірки використовуються дані з джерел високої просторової роздільної здатності, зокрема аерофотознімки з безпілотних літальних апаратів (*DJI Mavic, Autel EVO*) та супутникові знімки (*Sentinel-2, Landsat 8*), що дає змогу охопити різні масштаби спостереження та умови знімання.

Зібрані зображення проходять процес анотування, у межах якого кожен об'єкт, що підлягає розпізнаванню, позначається прямокутними рамками (*bounding boxes*) та класифікується відповідно до заданого набору класів. Для підвищення узагальнювальної здатності моделі застосовується аугментація даних, яка включає масштабування, повороти, дзеркальне відображення, зміну яскравості та контрастності зображень. Реалізація цього етапу може бути здійснена за допомогою платформи *Roboflow*, що забезпечує гнучке управління навчальними наборами та їх адаптацію до вимог моделей комп'ютерного зору.

Етап 2. Навчання нейронної мережі. Другий етап передбачає навчання згортової нейронної мережі, орієнтованої на задачі детекції та класифікації об'єктів у морському середовищі. У ме-

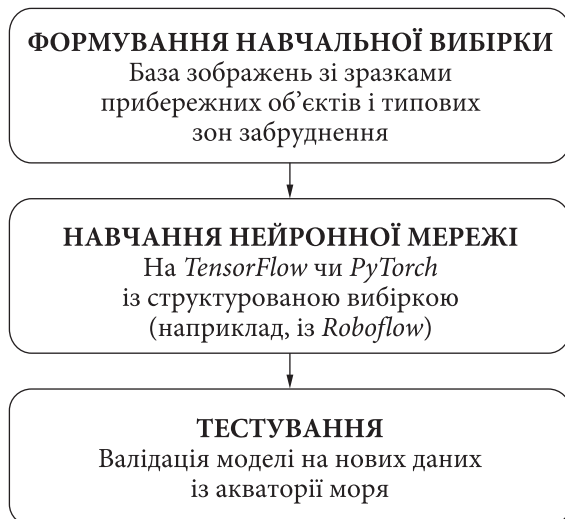


Рис. 3.5. Етапи дешифрування аерофотознімків для морських акваторій та прибережних зон
Джерело: наведено за [47].

жах дослідження як базові архітектури і користуються моделі типу YOLOv5/YOLOv8, що поєднують високу швидкість з достатньою точністю розпізнавання та є придатними для роботи в близькому до реального часу режимі.

Навчання моделі здійснюється у середовищах *TensorFlow* або *PyTorch* з використанням апаратного прискорення (*GPU*), що дає змогу реалізувати як локальне, так і хмарне навчання. У процесі навчання виконується оптимізація гіперпараметрів, зокрема розміру батча, кількості епох, швидкості навчання та коефіцієнтів регуляризації, з метою запобігання перенавчанню та підвищення стійкості моделі.

Якість навчання контролюється за допомогою стандартних метрик ефективності: точності (*accuracy*), повноти (*recall*), прецизійності (*precision*) та середньої точності детекції (*mAP*). Навчання триває до досягнення заданих порогових значень метрик або стабілізації функції втрат.

Однією з ключових вимог до моделі є **мінімізація часу обробки вхідного зображення**, що є критичним для завдань оперативного екологічного моніторингу. Ця вимога формалізується через коефіцієнт оперативності дешифрування $K_{\text{оп}}$, що визначається як відношення еталонного часу обробки до фактичного часу роботи моделі:

$$K_{\text{оп}} = \frac{T_{\text{еталон}}}{T_{\text{факт}}},$$

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 автоматизованого дешифрування аерофотознімків повинна виконуватися умова ефективності, відповідно до якої коефіцієнт оперативності дешифрування має бути не меншим за одиницю:

$$K_{\text{оп}} \geq 1.$$

Це означає, що фактичний час обробки зображень не перевищує допустимого (еталонного) часу, що є критично важливим для застосування системи в умовах оперативного екологічного моніторингу та реагування на надзвичайні ситуації.

Рівень точності та достовірності ідентифікації об'єктів визначається відсотковим співвідношенням правильно розпізнаних об'єктів до загальної кількості об'єктів, поданих на дешифрування. Для кількісної оцінки цього показника використовується індекс достовірності розпізнавання $I_{\text{дор}}$.

Розрахунок індексу достовірності розпізнавання здійснюється за формулою

$$I_{\text{дор}} = \frac{N_{\text{виявл_прав}}}{N_{\text{заг_об'єктів}}},$$

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 автоматизованого розпізнавання також повинна виконуватись умова ефективності, відповідно до якої індекс достовірності розпізнавання має бути не меншим за встановлений мінімально допустимий поріг $I_{\text{дор}(\min)}$, що визначається специфікою завдань екологічного моніторингу:

$$I_{\text{дор}} \geq I_{\text{дор}(\min)}.$$

Етап 3. На завершальному етапі модель проходить тестування на незалежній вибірці зображень, отриманих з інших районів акваторії або за інший часовий період. Це дає змогу перевірити її здатність до узагальнення, оцінити стійкість до зміни умов $D_{\text{нв}}$ — досягнутий рівень достовірності розпізнавання ОМІ запропонованою математичною моделлю (у частках від 1); знімання (освітленість, хвилювання водної поверхні, метеорологічні умови, висота польоту БПЛА) та підтвердити дотримання заданого рівня точності при застосуванні в реальних умовах моніторингу.

Такий підхід сприяє забезпеченню відповідності процесу дешифрування ключовим вимогам, зокрема підвищенню швидкодії ідентифікації об'єктів морської інфраструктури, що оцінюється за допомогою коефіцієнта прискорення дешифрування $K_{\text{пр}}$:

$$K_{\text{пр}} = \frac{T_{\text{наявний_метод}}}{T_{\text{автоматизований метод}}},$$

де $T_{\text{наявний_метод}}$ — середній час, необхідний для дешифрування об'єктів за допомогою традиційних (наприклад, ручних) методів; $T_{\text{автоматизований метод}}$ — час, витрачений на дешифрування тих самих об'єктів із використанням запропонованого автоматизованого методу.

Зазначимо, що актуальність цієї вимоги зумовлена суттєвими часовими витратами на аналітичне оброблення зображень за використання класичних методів, що у низці випадків призводить до втрати оперативності отриманих даних.

Ще одна ключова вимога — досягнення заданого рівня достовірності виявлення ОМІ, що характеризується коефіцієнтом підвищення достовірності ($K_{\text{дост}}$):

$$K_{\text{дост}} = \frac{D_{\text{нв}}}{D_{\text{цільової}}},$$

де $D_{\text{нв}}$ — досягнутий рівень достовірності розпізнавання ОМІ запропонованою математичною моделлю (у частках від 1); $D_{\text{цільової}}$ — мінімаль-

но допустимий або бажаний рівень достовірності, встановлений для завдань моніторингу.

Значущість дотримання зазначених вимог є надзвичайно високою, оскільки на сьогодні процес дешифрування аерофотознімків залишається складним, ресурсоємним і таким, що потребує значних часових витрат. Це, зі свого боку, призводить до затримок у надходженні аналітичної інформації та знижує її практичну цінність для оперативного реагування, що є особливо критичним в умовах швидкозмінного середовища, зокрема у прибережних, портових та урбанізованих зонах.

Розв'язання проблеми можливе шляхом інтеграції сучасних методів комп'ютерного зору та штучного інтелекту у процедури дешифрування аерофотознімків. Такий підхід ґрунтується на здатності інтелектуальних алгоритмів автоматично, з високою швидкістю та стабільною точністю ідентифікувати об'єкти морської інфраструктури, зони антропогенного впливу та екологічні аномалії на зображеннях, отриманих із БПЛА або супутникових платформ.

Водночас ефективність і продуктивність подібних систем істотно залежать від якості, обсягу та структурованості навчальних наборів даних. Чим більшим є масив репрезентативних зображень і чим точніше виконане їх анотування (маркування цільових об'єктів), тим вищою є ймовірність коректного розпізнавання об'єктів на нових, раніше не використаних знімках. Особливого значення набуває врахування різноманітних умов знімання — змін освітленості, стану морської поверхні, сезонних факторів і географічних особливостей досліджуваних акваторій.

Як правило, для побудови таких автоматизованих систем застосовуються згорткові нейронні мережі, інтегровані з методами машинного навчання. У цьому контексті особливо ефективними виявилися моделі серії *YOLO* (*You Only Look Once*), що завдяки поєднанню високої швидкодії, достатньої точності та відносної невибагливості до обчислювальних ресурсів стали одними з провідних рішень для задач реального часу, зокрема у сфері екологічного та безпекового моніторингу морських і прибережних зон [37].

Особливий інтерес у межах проведеного дослідження становлять моделі п'ятого покоління родини *YOLO* та їх сучасні модифікації, які демонструють низку суттєвих переваг, критично важливих для задач оперативного екологічного моніторингу. До переваг належать висока швидкість обробки зображень, відносна простота реалізації, а також низькі вимоги до апаратних ресурсів, що може застосовувати ці моделі не лише у серверних або хмарних середовищах, але й на периферійних обчислювальних пристроях.

Ефективна інтеграція моделей *YOLO* забезпечується використанням сучасних програмних платформ глибокого навчання, зокрема *PyTorch* та

TensorFlow. Перша характеризується компактною архітектурою, гнучкістю налаштувань, динамічною обчислювальною графікою та ефективним використанням оперативної пам'яті, що робить його зручним інструментом для наукових експериментів і прототипування. *TensorFlow*, зі свого боку, вирізняється широкими можливостями масштабування, підтримкою багатопроцесорних і розподілених обчислювальних середовищ, а також інтеграцією з хмарними сервісами, що є важливим для обробки великих обсягів аерокосмічних даних.

З урахуванням результатів численних наукових досліджень та практичних застосувань можна стверджувати, що алгоритми родини *YOLO* є перспективним інструментарієм для автоматизованого аналізу зображень. Їх використання у системах дешифрування аерофотознімків морських акваторій та прибережних зон дає змогу суттєво підвищити оперативність, точність і масштабованість екологічного моніторингу, що надважливо в умовах зростання антропогенного навантаження, воєнних ризиків та необхідності швидкого реагування на надзвичайні ситуації.

Фізичні принципи формування інформаційного сигналу у процесі дистанційного зондування морських акваторій

Ефективність традиційних контактних методів спостереження за якістю поверхневих вод суттєво підвищується завдяки впровадженню супутникових технологій дистанційного зондування Землі. Для завдань екологічного контролю морських акваторій ці технології забезпечують масштабну оглядовість і оперативне отримання інформації про стан водного середовища на великих територіях, можливість трансформації локальних (точкових) вимірювань у безперервні просторові поля параметрів, а також доступ до важкодоступних і віддалених районів, де проведення регулярних контактних спостережень є технічно або економічно ускладненим.

Фізичною основою супутникового моніторингу морських акваторій є реєстрація власного та відбитого електромагнітного випромінювання в трьох основних спектральних діапазонах: оптичному, інфрачервоному (ІЧ) та надвисокочастотному (НВЧ). Кожен із цих діапазонів формує інформаційний сигнал за різними фізичними механізмами та забезпечує отримання комплементарних відомостей про стан морського середовища.

В оптичному діапазоні спектра інформаційний сигнал формується за рахунок взаємодії сонячного випромінювання з поверхнею та товщею води. Світловий потік, що реєструється супутниковими сенсорами, складається з двох основних компонентів: дзеркального відбиття на межі «повітря — вода» та дифузного випромінювання, що виходить з-під водної поверхні. Перша складова описується коефіцієнтом дзеркального відбиття (КДЗВ), друга — коефіцієнтом дифузного відбиття (КДВ). Вели-

чина КДзВ визначається оптичними властивостями водної поверхні, показником заломлення, геометрією освітлення та спостереження, а також фізичним станом поверхні — наявністю хвиль, піни, поверхневих плівок нафтопродуктів чи інших аномальних утворень.

КДВ, зі свого боку, формується в результаті розсіювання та поглинання світла у верхньому шарі води і залежить від первинних гідрооптичних характеристик середовища: концентрації завислих речовин, вмісту фітопланктону, розчиненої забарвленої органічної речовини, а також їх вертикального розподілу. Саме цей компонент є основним носієм інформації про якість води, ступінь каламутності, рівень евтрофікації та біологічну продуктивність морських акваторій.

Одним з ключових завдань екологічного супутникового моніторингу є виявлення нафтових плівок та зон із підвищеною концентрацією органічних або мінеральних завислих речовин. Фізичний принцип ідентифікації нафтопродуктів в оптичному діапазоні базується на спектральному контрасті коефіцієнта відбивання між фоновою чистою водою та забрудненою поверхнею. Кількісною мірою цього контрасту є спектральний показник:

$$K(\lambda) = \frac{R(\lambda) - R_{\phi}(\lambda)}{R(\lambda)},$$

де $R(\lambda)$ — коефіцієнт відбиття ділянки з нафтовою плівкою, а $R_{\phi}(\lambda)$ — коефіцієнт відбивання фонової водної поверхні. За наявності товстих нафтових плівок значення $K(\lambda)$ є додатним у широкому діапазоні довжин хвиль, що приводить до формування характерних світлих або смугастих структур на оптичних супутникових знімках.

У ближньому та тепловому інфрачервоному діапазонах інформаційний сигнал формується переважно внаслідок власного теплового випромінювання поверхневого шару води. Яскравісна температура, що реєструється ІЧ-радіометрами, визначається термодинамічною температурою тонкого приповерхневого шару води, коефіцієнтом випромінювання та станом поверхні. Наявність нафтових плівок змінює тепловий баланс водної поверхні, пригнічуючи випаровування та впливаючи на теплообмін, що дає змогу виявляти забруднення за термальними аномаліями.

У надвисокочастотному (мікрохвильовому) діапазоні супутникові радіолокаційні сенсори (SAR) реєструють сигнал, формований внаслідок зворотного розсіювання електромагнітних хвиль на хвилях водної поверхні. Основним чинником, що визначає інтенсивність цього сигналу, є дрібномасштабна структура хвилювання, яка, зі свого боку, залежить від швидкості вітру та наявності поверхневих плівок. Нафтові забруднення пригнічують капілярні хвилі, що призводить до зменшення ефективної

площі розсіювання і формування темних плям на радіолокаційних зображеннях. Перевагою НВЧ-зондування є незалежність від освітлення та метеорологічних умов, що робить його особливо цінним для оперативного моніторингу.

Фізичні принципи формування інформаційного сигналу під час дистанційного зондування морських акваторій базуються на комплексній взаємодії електромагнітного випромінювання з водною поверхнею та верхнім шаром води. Поєднання оптичних, інфрачервоних і радіолокаційних методів дає змогу отримати взаємодоповнювальну інформацію про фізичний, хімічний і біологічний стан морського середовища, що є необхідною основою для автоматизованого дешифрування аерокосмічних знімків та побудови ефективних систем екологічного моніторингу.

У видимому (оптичному) діапазоні спектра нафтові забруднення характеризуються підвищеною відбивною здатністю порівняно з чистою водною поверхнею, унаслідок чого на супутникових і аерофотознімках вони, як правило, проявляються у вигляді світліших ділянок. За наявності інтерференційних явищ, зумовлених багат шаровою структурою нафтової плівки, просторовий розподіл яскравості набуває складного характеру. Зміна товщини плівки призводить до формування чергування світлих і темних смуг, особливо помітних на периферійних зонах нафтових плям.

Дифузна складова відбитого випромінювання, що описується коефіцієнтом дифузного відбиття (КДВ), визначається сукупністю гідрооптичних параметрів водного середовища, зокрема коефіцієнтами ослаблення (α), розсіювання (β), поглинання (κ) та формою індикатрисы розсіювання. Значення цих параметрів залежать від концентрації, розмірів і природи завислих частинок, а також від вмісту розчинених органічних речовин. Відомо, що спектральне поглинання чистою водою монотонно зростає зі збільшенням довжини хвилі, що зумовлює поступове зменшення КДВ у переході від синьої частини спектра до ближньої інфрачервоної області.

Фітопланктон характеризується специфічними спектральними особливостями, пов'язаними з поглинанням світла хлорофілом α , основні максимуми якого розташовані поблизу довжин хвиль $\lambda_1 \approx 430$ нм та $\lambda_2 \approx 675$ нм. За високих концентрацій пігментів ці особливості можуть чітко проявлятися у спектральному сигналі. Водночас у водах із підвищеною каламутністю спектральна структура суттєво згладжується, і зберігаються лише окремі характерні ознаки. Коректна кількісна оцінка вмісту хлорофілу в таких умовах потребує використання сенсорів із високою спектральною роздільною здатністю.

Багатозональні системи дистанційного зондування, які найчастіше застосовуються в практиці супутникового моніторингу, фіксують інтегральні зміни інтенсивності відбитого випромінювання у відносно широких спектральних каналах. Це дає змогу виявляти загальні тенденції

зміни стану водного середовища, однак обмежує можливість детектування вузькоспектральних особливостей, пов'язаних із поглинанням окремих пігментів. У відносно прозорих водах із низьким вмістом завислих речовин провідним фактором формування сигналу залишається власне поглинання світла водою, що визначає глибину шару, з якого формується відбитий оптичний сигнал.

В інфрачервоному діапазоні інформаційний сигнал формується переважно внаслідок власного теплового випромінювання надтонкого приповерхневого шару води товщиною до 0,02 мм, інтенсивність якого описується законом Планка. Температура цього шару часто відрізняється від температури нижніх горизонтів, що необхідно враховувати в інтерпретації результатів ІЧ-радіометрії. Відбивні та випромінювальні характеристики в інфрачервоному діапазоні залежать від наявності поверхневих плівок, піни, стану хвилювання та ефективного альбеда водної поверхні. Нафтові плівки здатні змінювати тепловий баланс, пригнічуючи випаровування, зменшуючи ефективну теплопровідність і демпфуючи хвильові процеси. Сукупна дія цих чинників може призводити як до підвищення, так і до зниження яскравісної температури, залежно від метеорологічних умов, товщини плівки та часу, що минув після її утворення.

У надвисокочастотному (мікрохвильовому) діапазоні основними інформативними параметрами є ефективна площа розсіювання (ЕПР) та радіояскравісна температура ($T_{\text{я}}$). Їх значення визначаються структурою хвильового поля водної поверхні та діелектричними властивостями водного середовища, які залежать від температури й солоності. Комплексна діелектрична проникність води:

$$\epsilon_{\text{в}} = \epsilon_{\text{в1}} + i\epsilon_{\text{в2}}$$

змінюється зі зростанням солоності та зі зміною частоти випромінювання. У довгохвильовій частині НВЧ-діапазону уявна складова $\epsilon_{\text{в2}}$ істотно зростає зі збільшенням солоності, що підсилює вплив цього параметра на формування радіолокаційного та радіометричного сигналу.

Наявність нафтової плівки на поверхні моря призводить до пригнічення дрібномасштабного хвилювання, що, зі свого боку, зумовлює зменшення ефективної площі розсіювання (ЕПР) за великих кутів зондування. За протилежних умов — зі зростанням швидкості вітру — інтенсивність хвильового збурення підвищується, що сприяє зростанню радіояскравісної температури $T_{\text{я}}$. Додатковий вплив на величину $T_{\text{я}}$ чинять інтерференційні ефекти, які є найбільш вираженими за умови, коли відношення товщини нафтової плівки до довжини хвилі випромінювання наближається до значення $h/\lambda \approx 0,15$. У разі подальшої трансформації нафтової плівки у водонафтову емульсію радіометричний контраст між забрудненою та фоновною водною поверхнею істотно зменшується.

У процесі активного зондування морських акваторій у надвисокочастотному (НВЧ) діапазоні визначальним фактором формування сигналу є хвильовий режим водної поверхні, який залежить від швидкості вітру, наявності поверхневих плівок та особливостей рельєфу дна. У пасивному НВЧ-моніторингу домінують такі чинники, як-от термодинамічна температура поверхневого шару, солоність води та присутність поверхневих забруднень. Зі збільшенням довжини хвилі понад 30 см істотно зростає чутливість реєстрованого сигналу до змін солоності морської води.

Загалом фізичні характеристики відбитого і власного електромагнітного випромінювання формуються під комплексним впливом оптичних, хімічних, теплових і механічних властивостей водного середовища. Саме ця багатофакторність зумовлює необхідність використання мультидіапазонних підходів у системах дистанційного зондування морських акваторій.

Ефективність традиційних контактних методів контролю якості поверхневих вод суттєво зростає завдяки впровадженню супутникових технологій ДЗЗ. Для завдань екологічного моніторингу морських акваторій такі технології забезпечують:

- широкомасштабну оглядовість і оперативне отримання інформації про стан морських вод на значних територіях;
- можливість перетворення локальних (точкових) вимірювань у безперервну просторову картину розподілу екологічних параметрів;
- доступ до віддалених, важкодоступних або потенційно небезпечних районів спостереження.

Фізичною основою супутникового моніторингу морських акваторій є реєстрація власного та відбитого електромагнітного випромінювання у трьох ключових спектральних діапазонах: оптичному, інфрачервоному та надвисокочастотному, кожен з яких має специфічну інформативність щодо стану водного середовища.

Узагальнені характеристики основних спектральних діапазонів дистанційного зондування, а також відповідні їм параметри морських вод наведено в таблиці 3.1.

Формування сигналу дистанційного зондування морських вод

Сигнал дистанційного зондування морських вод формується унаслідок низки фізичних процесів, зокрема взаємодії сонячного випромінювання з водною поверхнею, відбиття та розсіювання електромагнітних хвиль, а також впливу різноманітних природних факторів.

Формування сигналу дистанційного зондування морських вод відбувається за врахування таких чинників:

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

Взаємодія з поверхнею моря. Випромінювання, що досягає водної поверхні, взаємодіє з її фізичними та хімічними характеристиками. Це включає 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. Цей коефіцієнт визначає інтенсивність відбитого сигналу, який використовують для аналізу стану водної поверхні.

Коефіцієнт дифузного відбиття (КДВ). Водне середовище також зумовлює дифузію світлових хвиль, що розсіюються через наявність завислих частинок, органічних та неорганічних речовин (наприклад, пігментів фітопланктону, мікроскопічних часток). Це розсіювання світла знижує інтенсивність сигналу, що реєструється супутниковими сенсорами.

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

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

Таблиця 3.1. Основні параметри та спектральні діапазони дистанційного зондування морських вод

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

Джерело: узагальнено за даними [51—53].

Супутниковий сенсор. Спеціалізовані сенсори на супутниках реєструють ці сигнали (відбиті, розсіяні, інфрачервоні та радіохвилі) та передають їх на Землю для подальшої обробки. Сенсори, що працюють у межах спектральних діапазонів, дають змогу здійснювати точний моніторинг морських акваторій та прибережних зон, а також оцінювати фізичні та хімічні характеристики водного середовища.

Інтерпретація даних. Дані, отримані супутниковими сенсорами, інтерпретують для виявлення екологічних змін, зокрема забруднення води, коливань температури, оцінюванні біопродуктивності та інших параметрів, важливих для управління природними ресурсами, екологічної безпеки та реагування на надзвичайні ситуації.

Ця схема дає змогу здійснювати комплексний аналіз морських вод і 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

Топографічна основа для картографування екологічного стану акваторій

Сучасні геоінформаційні технології надають принципово нові можливості для ухвалення управлінських рішень у сфері охорони навколишнього середовища. Використання геоінформаційних систем для візуалізації та аналізу геопросторових даних забезпечує інтеграцію різноманітних інформаційних ресурсів у єдине об'єктно-орієнтоване середовище. Попри складність формування багаторівневих аналітичних запитів у системах підтримки прийняття рішень, ГІС мають суттєву перевагу у вигляді наочного, структурованого та інтерактивного подання результатів аналізу.

Проблемно-орієнтовані геоінформаційні системи, розглянуті у [41], уже підтвердили свою ефективність у вирішенні завдань екологічного моніторингу, охорони природних ресурсів та оцінки антропогенного впливу. ГІС, що розробляється в межах цієї науково-дослідної роботи, орієнтована на підтримку екологічної безпеки акваторій Чорного та Азовського морів. Її інформаційна структура сформована відповідно до прикладних завдань дослідження та спрямована на виявлення просторово-часових закономірностей взаємодії природних і антропогенних чинників.

Формування геоінформаційного фонду здійснювалося з урахуванням специфіки екологічного моніторингу морських акваторій. Геомодель місцевості та водної поверхні базується на поєднанні наявних картографічних матеріалів, офіційних статистичних даних, результатів супутникового моніторингу, а також польових досліджень та інструментальних вимірювань.

Інформаційні ресурси представлені у таких основних форматах:

- растровому — у формі актуальних та архівних супутникових знімків, а також сканованих і оцифрованих тематичних карт;
- векторному — у формі тематичних шарів, створених і структурованих у середовищі *ArcGIS*;
- табличному (текстовому) — у формі баз даних зі статистичними та тематичними показниками (середовище *MS Access*);
- графічному — у формі діаграм, графіків і систем умовних позначень.

Синтез геоінформаційної системи підтримки прийняття рішень для північно-західної частини Чорного моря реалізовано на базі програмного комплексу *ArcGIS 9.2*, що забезпечує роботу з багатшаровими просторовими даними та їх подальший аналіз.

До ключових особливостей побудованої геоінформаційної моделі належать:

1. Первинні картографічні матеріали — оцифровані та приведені до єдиної системи координат, що забезпечує коректну інтеграцію електронних топографічних основ і карт глибин у векторному форматі.

2. Реалізовано ієрархічну модель просторової організації даних, де інформація структурується за масштабами відповідно до топографічної сітки досліджуваної території. Такий підхід дає змогу оперативно виконувати вибірку, агрегування та комбінування даних різної просторової деталізації. Кожній одиниці просторового поділу присвоєно унікальний ідентифікаційний код, а координати її вершин зафіксовано відповідно до обраної картографічної проєкції.

3. Кожен векторний тематичний шар має власну атрибутивну базу даних, що містить опис об'єктів, їхні кількісні та якісні характеристики, а також параметри графічного відображення (колір, символи, текстури).

Ознаки дешифрування забруднень морських акваторій на знімках оптичного діапазону

Антропогенне забруднення морського середовища формується під впливом річкового та берегового стоку, підсилення абразійних процесів і підйому донних відкладень унаслідок діяльності людини, а також витоків нафти й нафтопродуктів різного походження (рис. 3.6—3.8). Найвищі концентрації забруднювальних речовин, як правило, спостерігаються в прибережних водах, що зумовлює необхідність ефективного екологічного моніторингу з оперативним виявленням типів забруднень, їх походження та можливих наслідків. Одним із ключових інструментів моніторингу є тематичне дешифрування супутникових знімків оптичного діапазону.

Процес дешифрування супутникових знімків передбачає поєднання візуального та автоматизованого аналізу, у межах яких використовуються

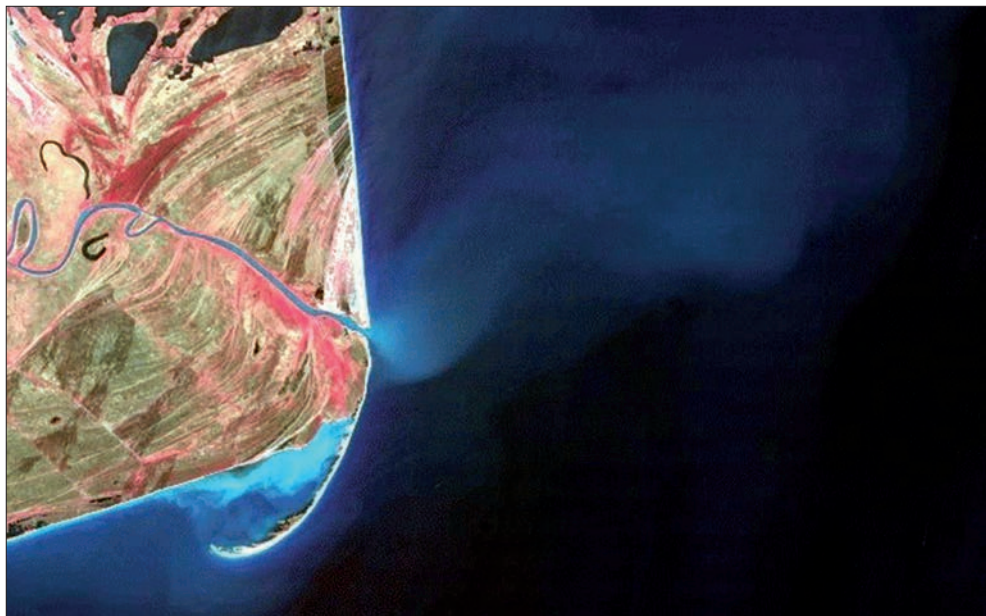


Рис. 3.6. Забруднення Чорного моря річковим стоком
Джерело: наведено за [47].

ознаки, що відображають просторові, спектральні та текстурні характеристики об'єктів [40]. Первинне візуальне дешифрування здійснюється шляхом логічного аналізу зображень із використанням комплексу інтерпретаційних ознак та залученням апріорної інформації, зокрема результатів попередніх дешифрувань, картографічних матеріалів, літературних джерел, відомчих даних, а також опорних супутникових спостережень.

Автоматизоване дешифрування ґрунтується на формалізації інтерпретаційних ознак, що дає змогу здійснювати кількісну оцінку параметрів забруднення, зменшувати суб'єктивність аналізу та підвищувати оперативність отримання результатів.

Дешифрувальні ознаки для моделювання

Дешифрувальні ознаки, що застосовують для моделювання антропогенних забруднень морських акваторій, умовно поділяються на дві основні групи: яскравісні та структурні.

До яскравісних ознак належать фототон (у чорно-білих знімках), кольоровий тон, насиченість і світлота (для багатоспектральних та спектрально-зональних зображень), а також цифрові значення яскравості або зональної яскравості пікселів. Зазначені ознаки широко застосовують для



Рис. 3.7. Забруднення Чорного моря береговим стоком
Джерело: наведено за [54].



Рис. 3.8. Цвітіння фітопланктону у Чорному морі (яскраві ділянки)
Джерело: наведено за [22].

оцінки оптичних властивостей водного середовища, зокрема прозорості води, концентрації завислих речовин, наявності органічного або мінерального забруднення. Наприклад, підвищення яскравості водної поверхні у прибережній зоні часто свідчить про зростання вмісту завислих частинок, пов'язаних із річковим або береговим стоком.

Структурні ознаки охоплюють геометричні параметри об'єктів (форма, розміри, контури), характер текстури, просторову організацію та розподіл яскравості. Вони є особливо інформативними під час аналізу знімків високої просторової роздільної здатності, де чітко простежуються межі забруднених ділянок, конфігурація плям та їх взаємодія з навколишнім середовищем. Аналіз структурних ознак дає змогу відрізнити антропогенні забруднення від природних процесів, як-от мілководдя, евтрофікація або сезонне цвітіння води.

У більшості випадків для підвищення достовірності розпізнавання застосовують комплексне поєднання структурних і яскравісних ознак. Наприклад, при ідентифікації плям забруднення, спричинених скидами речовин із підвищеною каламутністю, 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.

Для автоматизованої інтерпретації структурних ознак у процесі дешифрування застосовують математичні методи аналізу зображень, зокрема спектральний аналіз розподілу яскравості, формалізацію контурів об'єктів, а також статистичні характеристики гістограм яскравості:

Таблиця 3.2. Типові ознаки забруднень морських акваторій

Тип джерела забруднення	Яскравісні ознаки	Структурні ознаки	Коментарі
Річковий стік	Підвищена яскравість поблизу гирла	Розмиті контури плями, напрямок уздовж течії	Упізнавані за положенням відносно гирла річки
Нафтопродуктові розливи	Темні або світлі плями з чіткими межами	Витягнуті форми, іноді із закрученою текстурою	Часто спостерігаються поблизу судноплавних маршрутів
Абразія берегів	Підвищена каламутність біля берегів	Плямистість із нерівномірною текстурою	Активізується за штормової погоди
Евтрофікація / цвітіння	Зеленуваті або бірюзові зони	Тонка волокниста текстура, гладкі контури	Указує на надлишок біогенних елементів

Джерело: складено за [41].

середнє значення, дисперсію, ентропію, коефіцієнти асиметрії та ексцесу. Додаткове використання медіанних значень, локальних середніх і ковзних вікон дає змогу зменшити вплив шумів і підвищити точність моделювання (табл. 3.2).

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 застосовують спектральні та морфометричні методи: аналіз розподілу яскравості в частотній області, оцінка параметрів форми контурів і текстурних моделей.

Кожен тип забруднення характеризується унікальним набором дешифрувальних ознак, зокрема формою, розмірами й текстурою плям на морській поверхні. Це дає змогу з високим ступенем точності проводити ідентифікацію джерел забруднення та здійснювати якісну оцінку екологічного стану акваторії.

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. До точкових джерел належать промислові та комунальні скиди, а також гирла забруднених річок. Їх візуальне виявлення на супутникових знімках — у чорно-білому і у видимому спектральному діапазоні — ґрунтується на фіксації зон аномальної яскравості, які просторово пов'язані з місцями скиду. Найбільше відхилення яскравісних характеристик від фонових значень спостерігається безпосередньо в районі джерела викиду. Залежно від оптичних властивостей забруднювальних речовин, яскравість зони забруднення може бути як підвищеною (у разі домінування світлорозсіювальних суспензій), так і зниженою (за наявності речовин із високими поглинальними властивостями). Просторова форма поширення викидів зазвичай має факело- або пелюсткоподібну конфігурацію, орієнтовану вздовж напрямку водних течій.

До дифузних джерел забруднення належать поверхневий стік із сільськогосподарських угідь, абразійні процеси берегової зони, а також розмиви відмілин. Їх виявлення можливе завдяки просторовим відмінностям концентрації зважених речовин між забрудненими та фоновими водами. Як правило, у зонах дифузного впливу фіксується підвищений вміст зважених частинок, що зумовлює зміну характеристик дифузного відбиття сонячного випромінювання від водної поверхні. На супутни-

кових знімках такі ділянки візуалізуються у вигляді зон із підвищеною або зниженою яскравістю, що може надійно ідентифікувати їх навіть під час візуального дешифрування з використанням яскравісних і текстурних ознак.

Моніторинг процесів евтрофікації здійснюється шляхом аналізу варіацій коефіцієнта дифузного відбиття світла від поверхневих і підповерхневих шарів води, величина якого змінюється залежно від концентрації фітопланктону [34]. Зі зростанням біомаси фітопланктону збільшується інтенсивність розсіювання світла у видимому діапазоні, що відображається у відповідних яскравісних та спектральних характеристиках супутникових знімків.

Характерною текстурною ознакою евтрофікації є наявність ниткоподібної, плямистої або мозаїчної структури зображення, що формується внаслідок нерівномірного просторового розподілу водоростей у зонах інтенсивного «цвітіння» води. Такі структури добре ідентифікуються на багатозональних і синтезованих кольорових зображеннях та є важливими індикаторами біологічного забруднення акваторій.

Характерні ознаки антропогенних і природних забруднень, притаманні акваторіям Чорного та Азовського морів, були визначені на основі аналізу значного масиву супутникових знімків, що відображають різні типи екологічних порушень у різноманітних гідрометеорологічних та сезонних умовах. Отримані результати дали змогу сформулювати узагальнений перелік дешифрувальних ознак, релевантних для зазначених морських басейнів.

Нині триває робота з формалізації та виділення штучних (машиночитних) ознак, які можуть бути безпосередньо використані в алгоритмах автоматизованої класифікації. До таких ознак належать статистичні параметри яскравості, спектральні індекси, текстурні характеристики та просторові метрики, що забезпечують можливість переходу від експертного візуального аналізу до інтелектуальних методів обробки даних.

Побудова гіпотез щодо природи спостережуваних плям на морській поверхні ґрунтується на систематичному аналізі комплексу дешифрувальних ознак. З урахуванням накопиченого досвіду тематичного аналізу супутникових даних було визначено перелік найбільш інформативних природних ознак, що уможливають здійснення надійної диференціації типів забруднень, характерних для зазначених морських басейнів, та слугують основою для побудови автоматизованих систем екологічного моніторингу.

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

Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки

У практиці морського екологічного моніторингу одним із найефективніших інструментів є побудова картографічних моделей плямистості акваторій, які здатні виявляти джерела забруднення, оцінювати просторові масштаби та часову динаміку їх поширення, а також здійснювати об'єктивну оцінку екологічного стану окремих ділянок моря або територій [36].

Картографування плям забруднення базується на реалізації алгоритмів автоматизованого розпізнавання та класифікації, що забезпечують віднесення кожного елемента зображення S_r супутникового знімка до одного з наперед визначених класів якості води. Такий підхід дає змогу перейти від якісного опису спостережуваних явищ до формалізованого кількісного аналізу просторового розподілу забруднень.

Для підвищення достовірності ідентифікації морських забруднень у процесі картографування враховується комплекс взаємопов'язаних дешифрувальних чинників:

- локалізація та природа джерел забруднення, серед яких точкові та дифузні викиди;
- відхилення фототону або спектральних характеристик від фонового значення, що відображає зміну оптичних властивостей води;
- структура текстури зображення, яка дає змогу диференціювати антропогенні та природні процеси;
- форма і конфігурація контурів плям, пов'язані з гідродинамічними умовами поширення забруднення;
- топографічні та планувальні характеристики прибережних урбанізованих зон, що впливають на інтенсивність і характер антропогенного навантаження.

Комплексне врахування зазначених чинників забезпечує підвищення точності автоматизованого дешифрування супутникових знімків і створює надійну основу для побудови просторово-часових моделей забруднення морських акваторій у системах геоінформаційного аналізу.

Кожна виявлена на супутниковому знімку пляма або аномальна ділянка морської поверхні має бути віднесена до одного з наперед визначених класів якості води або типів забруднення. Для цього формується класифікатор — правило або математична модель, за якою елемент зображення, описаний вектором ознак, може бути віднесений до конкретного класу.

Побудова класифікатора здійснюється на основі навчальних вибірок, сформованих із пікселів або їхніх груп з відомою класовою приналежніс-

тю. Така приналежність визначається шляхом попереднього візуального дешифрування із залученням апріорної інформації, включаючи картографічні матеріали, результати польових спостережень і дані попередніх досліджень. Задача розв'язується в межах теорії розпізнавання образів шляхом навчання класифікаційної моделі.

Класифікатором, як правило, слугує вирішальна (дискримінантна) функція, що є функцією від вектора параметрів об'єкта. Вона використовується для ухвалення рішення щодо належності окремого пікселя або просторового елемента зображення до одного з можливих класів. Оптимальною вважається така дискримінантна функція, яка мінімізує ймовірність помилкової класифікації або середній ризик ухвалення рішення.

Вектор параметрів формується на основі дешифрувальних ознак, характерних для різних типів морських забруднень. У контексті супутникового моніторингу він містить як природні ознаки (спектральні характеристики, яскравість, текстура, форма плям), так і штучні (похідні) ознаки, отримані унаслідок математичних перетворень зображень, зокрема статистичні характеристики яскравості, спектральні індекси та текстурні параметри.

Важливим етапом тематичного аналізу є векторизація ділянок з аномальними яскравісними або спектральними характеристиками, що дає змогу перейти від піксельного подання до об'єктно-орієнтованого аналізу. З цією метою в межах дослідження розроблено програмний засіб *Sea Image Processor (IMPROC)*, призначений для візуалізації, попередньої обробки та аналізу супутникових знімків морської поверхні. Основною метою створення цього програмного комплексу є підвищення ефективності автоматизованого виділення аномальних зон і їх подальшого аналізу без втрати просторової та спектральної інформативності зображень.

Аналіз просторово-спектральних контрастів є одним із ключових підходів у розв'язанні завдань дистанційного контролю екологічного стану морських і прибережних територій [42]. Попри те, що основні антропогенні джерела забруднення, як правило, ідентифіковані заздалегідь, інтенсивність і просторові масштаби їх впливу істотно змінюються під дією гідродинамічних, метеорологічних та техногенних чинників. Обсяги скидів, рівень попередньої очистки, характер течій і вітровий режим безпосередньо впливають на формування та трансформацію зон забруднення, що ускладнює їх оперативну оцінку.

У зв'язку з цим виникає необхідність автоматизованого виділення та оконтурювання ділянок акваторій, де спектральні характеристики яскравості водної поверхні істотно відрізняються від фонових значень і можуть свідчити про наявність антропогенного впливу. Такі ділянки, як правило, відповідають зонам підвищеної концентрації завислих речовин, органічного забруднення або нафтопродуктів.

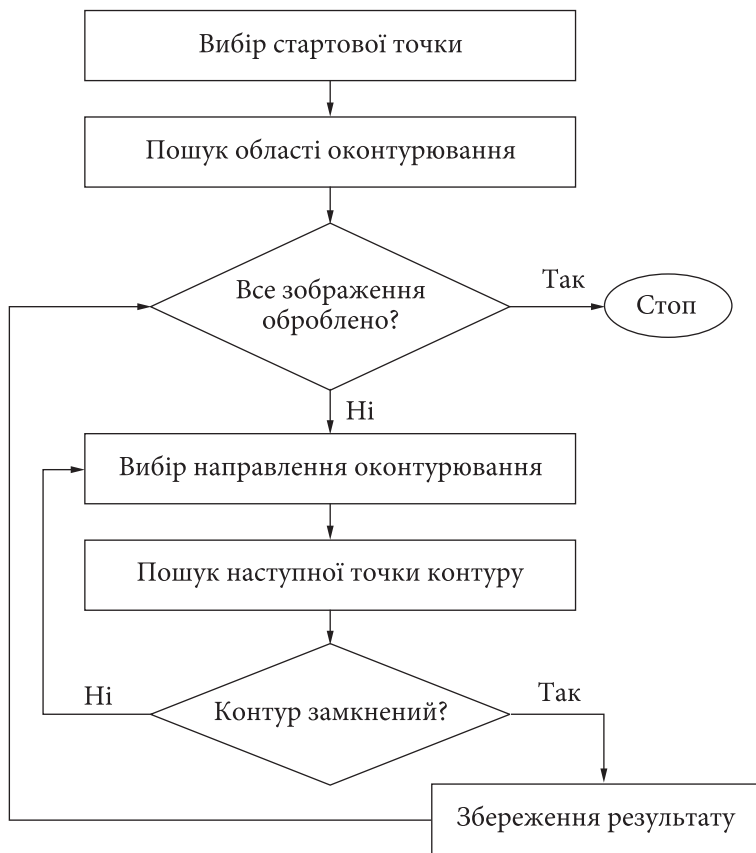


Рис. 3.9. Алгоритм векторизації контуру виділеної ділянки
Джерело: адаптовано за [48, 50].

У дослідженні розроблено алгоритм автоматизованої векторизації меж забруднених зон на основі аналізу яскравісних і текстурних контрастів супутникових знімків (рис. 3.9). Алгоритм передбачає поетапне виділення аномальних пікселів за заданими пороговими значеннями, подальшу просторову фільтрацію та морфологічну обробку результатів з метою формування стійких замкнених контурів. Отримані контури трансформуються у векторний формат, що забезпечує можливість їх подальшого просторового аналізу та інтеграції з геоінформаційними системами.

Запропонована методика автоматизованого оконтурювання і векторизації забруднених ділянок дає змогу підвищити точність, об'єктивність і відтворюваність оцінювання параметрів антропогенного навантаження за даними дистанційного зондування. Її застосування створює основу для формування тематичних екологічних карт, аналізу динаміки забруднення та використання результатів у сучасних ГІС-платформах

для ухвалення управлінських рішень у сфері екологічної безпеки морських акваторій.

Процедура автоматизованого оконтурювання плям забруднення реалізується у вигляді послідовності взаємопов'язаних етапів, кожен з яких спрямований на підвищення точності виділення меж аномальних ділянок морської поверхні. Основні етапи:

- ідентифікація аномальних зон акваторії на основі природних або штучно сформованих яскравісних ознак, що відрізняють забруднені ділянки від фонових водного середовища;
- побудова гістограми розподілу яскравісних значень зображення та визначення порогового рівня, який забезпечує відокремлення цільових областей від фону;
- пошук стартової точки контуру шляхом послідовного попиксельного аналізу растрового зображення;
- виконання повної векторизації виділеної області з автоматизованим визначенням напрямку обходу контуру.

Результати оконтурювання зберігаються у вигляді окремих векторних файлів, що підтримують масштабування, перетворення координат і подальшу інтеграцію в геоінформаційні системи, зокрема середовища типу *ArcView*. Застосування векторизації забезпечує не лише просторову фіксацію меж забруднених плям, але й можливість кількісної оцінки їх параметрів із використанням статистичних і текстурних характеристик.

Крім того, векторизований контур може бути інтерпретований як функціональна залежність довжини вектора від приросту полярного кута, що дає змогу формалізувати текстурні ознаки геометричної форми плями. Такий підхід створює передумови для подальшої математичної та статистичної обробки даних, зокрема із застосуванням методів аналізу геометричних характеристик об'єктів антропогенного забруднення.

3.5. Інструменти для побудови картографічних моделей плямистості акваторій Чорного моря після руйнування Каховської ГЕС

Після руйнування Каховської гідроелектростанції формування картографічних моделей просторової неоднорідності акваторій Чорного моря набуло особливої актуальності як складова системи оперативного екологічного моніторингу. Такі моделі є інструментом виявлення та аналізу просторового розподілу забруднень, трансформації гідрологічного режиму та змін у прибережних екосистемах. Для їх створення застосовується комплекс сучасних інструментів, що поєднують супутникові технології, геоінформаційні системи, методи спектрального аналізу та алгоритми автоматизованої обробки даних.

Базовим джерелом інформації є дані дистанційного зондування Землі, отримані з супутникових сенсорів, які працюють у різних спектральних діапазонах. Для аналізу плямистості водної поверхні використовують мультиспектральні, гіперспектральні та радіолокаційні знімки. Супутникові платформи *Sentinel-2*, *Landsat*, *Maxar* та інші забезпечують регулярне надходження даних, що дають змогу оцінювати рівень антропогенного забруднення, ідентифікувати нафтові плями, аналізувати процеси евтрофікації, а також досліджувати зміни берегової лінії й ландшафтною структури прибережних зон. Використання радарних даних *Sentinel-1* забезпечує можливість спостережень за станом водних мас незалежно від хмарності та освітленості, що є критично важливим в умовах нестабільних метеорологічних ситуацій.

У відповідь на наслідки руйнування Каховської ГЕС було реалізовано спеціалізований проєкт екологічного моніторингу північно-західної частини Чорного моря. У межах цього проєкту поєднувалися супутникові спостереження, результати контактних вимірювань та інструменти математичного моделювання. Для аналізу гідрофізичних процесів і прогнозування просторово-часового поширення забруднювальних речовин застосовувалося чисельне моделювання в середовищі *Delft3D Mesh Suite*, що дало змогу комплексно оцінити зміну гідродинамічної обстановки внаслідок аварійного впливу.

Моніторинг акваторії Чорного моря із застосуванням сучасних інформаційних технологій є одним із ключових напрямів пріоритетних наукових досліджень у галузі екологічної безпеки, раціонального використання природних ресурсів та забезпечення сталого розвитку прибережних територій. Актуальність цього напрямку суттєво зростає в умовах глобальних кліматичних змін, інтенсифікації морського судноплавства, зростання промислового навантаження та наявності воєнних загроз, що комплексно впливають на гідроекологічний стан Чорноморського басейну. Застосування інформаційних технологій дає змогу реалізувати оперативний, системний і високоточний контроль параметрів морського середовища, що є неможливим лише за допомогою контактних методів спостереження.

Фундаментальною основою такої системи моніторингу є супутникові технології дистанційного зондування Землі, які забезпечують регулярне отримання знімків із великим територіальним охопленням та різними характеристиками просторової роздільної здатності, спектральної чутливості та періодичності оновлення. Зокрема, супутникові платформи *Sentinel-1*, що використовують радіолокаційну зйомку (SAR), та *Sentinel-2* з мультиспектральними сенсорами, що належать до програми *Copernicus*, широко практиковані для спостереження за температурним режимом поверхневих вод, оптичними характеристиками водної товщі, виявлення

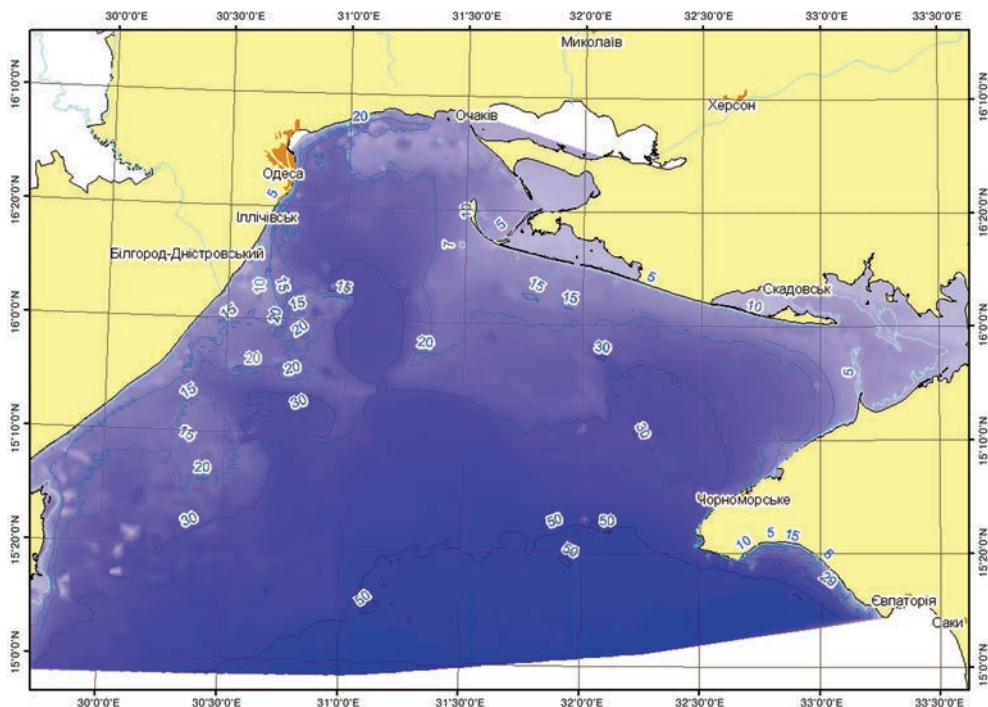


Рис. 3.10. Картографування берегової лінії та просторових змін у морських екосистемах

Джерело: наведено за [48, 50].

забруднень, а також для детального картографування берегової лінії та аналізу просторово-часових змін у морських екосистемах (рис. 3.10).

Вагоме значення у системі цифрового моніторингу акваторії Чорного моря має застосування спектральних індексів та алгоритмів автоматизованої класифікації. Зокрема, індекси стану водного середовища, як-от *NDWI* (*Normalized Difference Water Index*), широко використовуються для визначення меж водної поверхні, оцінки змін прозорості води, концентрації фітопланктону та вмісту завислих частинок. Поєднання супутникових даних із методами машинного навчання — зокрема алгоритмами *Random Forest*, *Support Vector Machine* (*SVM*) та штучними нейронними мережами — забезпечує можливість автоматизованого виявлення зон забруднення, ідентифікації нафтових плям, техногенних викидів, а також аналізу динаміки змін берегової лінії.

Сучасні геоінформаційні системи та хмарні платформи оброблення супутникових даних, зокрема *Google Earth Engine*, *Copernicus Open Access Hub* і *NASA Worldview*, значно розширюють аналітичні можливості дослідників у сфері просторово-часового аналізу. Використання таких середовищ дає

змогу виконувати ретроспективні дослідження на основі архівних супутникових знімків і забезпечувати оперативний доступ до нових даних спостережень. Це критично важливо у разі виникнення аварійних ситуацій, розливів нафтопродуктів або масштабних екологічних інцидентів.

Комплексний моніторинг Чорноморської акваторії також передбачає аналіз гідродинамічних процесів, температурних аномалій, просторового розподілу хлорофілу α , солоності вод та напрямків морських течій. Так, дані сенсорів *MODIS*, встановлених на супутниках *Aqua* і *Terra*, а ще інструментів *VIIRS* на платформах *Suomi NPP* та *NOAA-20*, дають змогу досліджувати великомасштабні океанографічні явища, зокрема процеси евтрофікації, апвелінгу та масового цвітіння води.

В умовах воєнних загроз і техногенного забруднення, спричиненого бойовими діями, включно з вибухами, руйнуванням портової інфраструктури або затопленням суден, супутникові технології набувають особливої значущості. Вони дають змогу фіксувати зміни структури водної поверхні, оцінювати масштаби й напрями поширення забруднювальних речовин, а також прогнозувати потенційні наслідки для прибережних екосистем. У цьому контексті ключову роль відіграє інтеграція оптичних даних із радарними знімками, отриманими із супутників *Sentinel-1*, *COSMO-SkyMed* та *TerraSAR-X*, які забезпечують надійне виявлення нафтових забруднень незалежно від метеорологічних умов і часу доби.

Поеднання супутникових даних дистанційного зондування Землі з результатами *in situ* спостережень, зокрема вимірюваннями з буйкових систем, гідрологічних станцій та автономних сенсорів, створює підґрунтя для формування гібридних моделей оцінювання екологічного стану Чорного моря. Такі моделі базуються на комплексному використанні космічної інформації та безпосередніх фізико-хімічних показників водного середовища, а саме: температури, водневого показника (pH), солоності і концентрації розчинених речовин. Інтеграція різнорідних джерел даних істотно підвищує достовірність оцінок, точність прогнозування екологічних процесів та ефективність управлінських рішень у сфері охорони морського довкілля.

У довоєнний період одним із суттєвих чинників антропогенного навантаження на морські акваторії залишався скид зворотних вод із зрошувальних систем, зокрема на території Херсонської області. Найбільшого впливу зазнавали Каржинська, Джарилгацька, Каланчацька та Перекопська затоки, куди систематично надходили зворотні води з рисових чеків, насичені агрохімічними речовинами. У роки, що передували повномасштабному вторгненню, відбувалося поступове впровадження екологічно орієнтованих технологій вирощування рису, спрямованих на зменшення пестицидного та агрохімічного навантаження на водні екосистеми.

Однак у 2022—2023 рр. система зрошення та водогосподарська інфраструктура зазнали значних руйнувань унаслідок бойових дій. Наймасш-

табнішим екологічним потрясінням став підрив Каховської гідроелектростанції у червні 2023 р., що призвів до катастрофічного затоплення дельти Дніпра та фактичного знищення каналів зрошення й осушення. У результаті сотні тисяч гектарів сільськогосподарських земель перетворились на заболочені території. Зворотні води з підтоплених рисових полів і зруйнованих елементів аграрної інфраструктури у великих обсягах надходять до прибережних морських заток, транспортуючи забруднювальні компоненти, зокрема нітрати, фосфати, гербіциди та пестициди.

Згідно з оновленими результатами інвентаризації, до переліку екологічно небезпечних об'єктів необхідно віднести нові так звані гарячі точки, що виникли внаслідок воєнних дій. До них належать зруйновані склади нафтопродуктів, пошкоджені ділянки водопровідно-каналізаційних мереж, затоплені об'єкти інфраструктури, на яких зберігалися мінеральні добрива та інші хімічні речовини. За інформацією органів екологічного контролю, лише у 2023 р. до прибережних вод південних регіонів України потрапило понад 300 тис. т промислових відходів із пошкоджених підприємств та аграрних складів.

Додатковим фактором погіршення екологічного стану стали атаки на морські порти та судна, внаслідок яких фіксуються численні випадки розливу паливно-мастильних матеріалів. Утворені нафтові плями негативно впливають на фітопланктон, міграційні шляхи риб та популяції водоплавних птахів. Окрім цього, дрібнодисперсні частинки металів і залишки вибухових речовин, що накопичуються після бойових дій, здатні змінювати хімічний склад морської води, підвищуючи її токсичність і екологічні ризики (табл. 3.4).

Інтегрування отриманих даних у геоінформаційні системи дає змогу виконувати поглиблений просторовий аналіз, будувати моделі трансформації середовища та прогнозувати подальшу еволюцію екологічних про-

Таблиця 3.4. Параметри вимірювання в пунктах спостереження якості морських вод

Категорія пункту	Глибини відбору проб	Забруднювальні речовини	Призначення
1 (прибережна зона)	Поверхня, 5, 10, 20 м, дно	Нафта, ПАР, феноли, важкі метали	Контроль у зонах скиду, портів, рекреації
2 (перехідна зона)	Поверхня, 10 м, дно	Ті самі + мігруючі речовини	Моніторинг переносу забруднень
3 (відкрите море)	Поверхня, 10, 50, 100 м, дно	Важкі метали, вуглеводні	Формування балансу речовин

Джерело: узагальнено за [48, 55].

цесів в акваторії Чорного моря. З метою підвищення точності картографування плямистості водної поверхні застосовуються спектральні індекси, зокрема NDWI (*Normalized Difference Water Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) та FUI (*Floating Unnatural Index*), що дають змогу диференціювати різні типи забруднень, а також кількісно оцінювати рівень чистоти водного середовища.

Використання алгоритмів машинного навчання та глибоких нейронних мереж забезпечує автоматизацію процесів класифікації об'єктів і виявлення просторово-часових змін на супутникових знімках, що істотно підвищує точність результатів та ефективність моніторингових процедур. Інтеграція супутникових і аналітичних даних у спеціалізовані хмарні платформи, зокрема *Google Earth Engine* та *Copernicus Open Access Hub* (з листопада 2023 р. — *Copernicus Data Space Ecosystem*), створює передумови для формування комплексних тематичних карт, моделювання можливих екологічних наслідків руйнування гідротехнічних споруд і забезпечення своєчасного реагування на зміни, спричинені надзвичайними інцидентами.

Висновок

Запропоновано та обґрунтовано підходи до інтеграції сучасних інформаційних технологій, зокрема супутникового дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем і методів машинного навчання, які продемонстрували високу ефективність у завданнях моніторингу екологічного стану Чорного моря. Реалізовані підходи забезпечують оперативну та достовірну оцінку стану морських акваторій в умовах інтенсивного антропогенного впливу та природної мінливості середовища.

Розроблено математичні моделі автоматизованого дешифрування супутникових знімків, що базуються на алгоритмах машинного навчання, зокрема згорткових нейронних мережах і архітектурі *YOLOv5*. Запропоновані моделі забезпечують автоматичне виявлення зон забруднення, класифікацію типів антропогенних впливів і прогнозування їх просторово-часового розвитку, що істотно підвищує обґрунтованість та ефективність управлінських рішень у сфері екологічної безпеки.



У четвертому розділі викладено методологічні засади удосконалення технологій інтегрованого аерокосмічного моніторингу морських акваторій, що ґрунтуються на використанні сучасних інформаційних і обчислювальних рішень. Основну увагу зосереджено на підвищенні ефективності оброблення великих масивів супутникових даних дистанційного зондування Землі з метою оперативного виявлення та аналізу екологічних змін у Чорному й Азовському морях.

У межах розділу проаналізовано підходи до оптимізації обчислювальних процесів під час роботи з супутниковими зображеннями, отриманими з платформ *Sentinel-2*, *Landsat-8*, *MODIS* і *WorldView*, з урахуванням специфіки задач екологічного моніторингу. Зокрема, розглянуто виявлення забруднень водного середовища, фіксацію змін берегової лінії, детекцію нафтових плям, аналіз температурних аномалій та інших екологічно значущих параметрів. Проведено порівняльну оцінку ефективності реалізації обчислень у різних середовищах — на традиційних *CPU*-серверах, у високопродуктивних *GPU*-кластерах, на хмарних платформах (*Google Earth Engine*, *AWS*, *Azure*), а також із застосуванням технологій контейнеризації (*Docker*, *Kubernetes*).

Запропоновано архітектурно-функціональну модель інтегрованої ІТ-системи, що поєднує механізми паралельної обробки даних, алгоритми глибокого навчання для автоматизованого дешифрування супутникових знімків, засоби геоінформаційного аналізу та інструменти швидкого розгортання сервісів у хмарному середовищі. Реалізація такого підходу дає змогу скоротити час оброблення типових запитів щодо моніторингу стану морських акваторій на 30—40 % порівняно з традиційними рішеннями, а також забезпечує гнучке масштабування обчислювальних ресурсів відповідно до складності задач і обсягів вхідних даних.

Окрему увагу в розділі приділено опису процедур попередньої обробки супутникових знімків, зокрема маскуванню хмарності, нормалізації спектральних каналів і фільтрації шумів, а також реалізації модулів автоматизованої класифікації забруднень і формування багат шарових екологічних картограм. Підкреслено важливість високої обчислювальної готовності розробленої системи для оперативного використання результатів у кризових ситуаціях, під час моніторингу бойових дій у прибережних районах та оцінювання екологічних ризиків для природоохоронних територій.

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

Розроблення векторизованих топографічних карт прибережних областей та карти глибинних ізобат морської акваторії

Аналіз кола основних тематичних завдань супутникового моніторингу акваторії Чорного моря показує, що для їх якісного та ефективного розв'язання доцільно залучати матеріали дистанційного зондування, отримані з різних супутникових платформ. Зокрема, у межах дослідження використовуються дані знімання супутників NOAA, Landsat, SPOT, Ikonos, QuickBird, EROS, ASTER, IRS, Radarsat та ін. Технічні характеристики зазначених супутникових систем і джерела отримання відповідних зображень детально описані в наступному підрозділі роботи.

Сучасний підхід до впровадження супутникових технологій для моніторингу морських акваторій, що зазнають впливу прибережної інфраструктури, річкового стоку, господарської діяльності в межах територіальних вод і виключної економічної зони, а також інтенсивного морського транспорту, базується на комплексному використанні матеріалів супутникового знімання та геоінформаційних технологій [42]. Застосування ГІС забезпечує точну просторову прив'язку як вихідних космічних зображень, так і картографічних моделей, сформованих за результатами тематичного дешифрування.

У цьому контексті ключову роль відіграють геоінформаційні платформи. З урахуванням їх функціональних можливостей, вартості впровадження, масштабованості та сумісності з іншими програмними продуктами, найбільш доцільним є використання системи ArcGIS як базового середовища для реалізації супутникового моніторингу акваторії Чорного моря. Основу побудованої ГІС-моделі становлять векторизовані топографічні карти прибережних територій і батиметричні карти глибинних ізобат морської акваторії.

Для формування топографічної основи використовувалися картографічні матеріали Одеської, Миколаївської, Херсонської областей та Автономної Республіки Крим масштабу 1:200 000, розроблені за замовленням ДСНС України. Векторна батиметрична карта морської акваторії була створена відповідно до авторської алгоритмічної методики.

Процес тематичного оброблення космічних зображень морських акваторій, як правило, передбачає етап сегментації — поділ зображення на однорідні ділянки за спектральними, термічними або електромагнітними характеристиками. Для реалізації цього етапу доцільно застосовувати спеціалізовані програмні засоби середовища *ERDAS IMAGINE*, які забезпечують ефективне оброблення багатоспектральних і радарних даних та підготовку інформації для подальшого тематичного аналізу.

Екологічна інтерпретація картографічних моделей, сформованих у результаті дешифрування супутникових знімків

У запропонованому дослідженні розроблено авторський програмний комплекс, призначений для тематичного аналізу супутникових знімків морських акваторій. Його функціонування ґрунтується на концепції виявлення та аналізу плямистих структур, формування яких зумовлене просторово-часовою мінливістю гідрооптичних, гідроелектричних і гідробіологічних параметрів водного середовища.

Під час ідентифікації структур плямистості враховувалися спектральні характеристики використаних сенсорів, а також їх інформативність у відповідних діапазонах електромагнітного спектра. Для підвищення достовірності результатів оброблення зображень застосовували алгоритми сегментації, що базуються на аналізі гістограм яскравості, методах частотної фільтрації, оцінюванні текстурних особливостей та використанні показників просторової кластеризації.

На основі отриманих результатів сформовано спеціалізовану базу знань предметно-орієнтованого характеру, яка забезпечує інтерпретацію виявлених структур, автоматизовану векторизацію кластерів та збереження їх у вигляді тематичних шарів у форматах, сумісних із геоінформаційними системами.

У процесі екологічної інтерпретації картографічних моделей, сформованих за результатами тематичного дешифрування супутникових знімків беруть до уваги ретроспективну інформацію, що містить:

- дані державної системи моніторингу поверхневих вод;
- звітні матеріали водокористувачів;
- топографічні та просторові характеристики потенційних джерел забруднення.



■ Тимчасово окуповані території під контролем російських військ

Розповсюдження забрудненої води

■ 15.06.2023 (вітер Пн-З)

■ 08.06.2023 (вітер Пн-Сх)

■ 10.06.2023 (вітер Пд-Сх)

■ 06.06.2023 (вітер Пд-Сх)

Рис. 4.1. Техногенне навантаження регіону досліджень

Джерело: адаптовано та складено [29, 49].

Прикладами структурованої атрибутивної інформації, використаної в рамках дослідження, є дані, наведені в таблицях 4.1 і 4.2. Зокрема, таблиця 4.1 містить дані щодо обсягів скидів у Миколаївській області за період 2015—2022 років, а в таблиці 4.2 представлено середньорічні концентрації основних забруднювальних речовин у контрольних водних створах регіону за 2020 рік (рис. 4.1).

Картографічна модель у середовищі геоінформаційних систем, що відображає джерела забруднення Чорного моря, формується з метою про-

Таблиця 4.1. Об'єми скидів стічних вод (Миколаївська область)

Назва водокористувача	Об'єм, млн. м ³ (2015)	Забруднення, т (2015)	Об'єм, млн. м ³ (2020)	Забруднення, т (2020)	Об'єм, млн. м ³ (2022)	Забруднення, т (2022)
МКП «Миколаївводоканал»	35,73	39 140,143	30,15	30 907,043	29,108	29 888,54
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

Джерело: адаптовано та складено [29, 49].

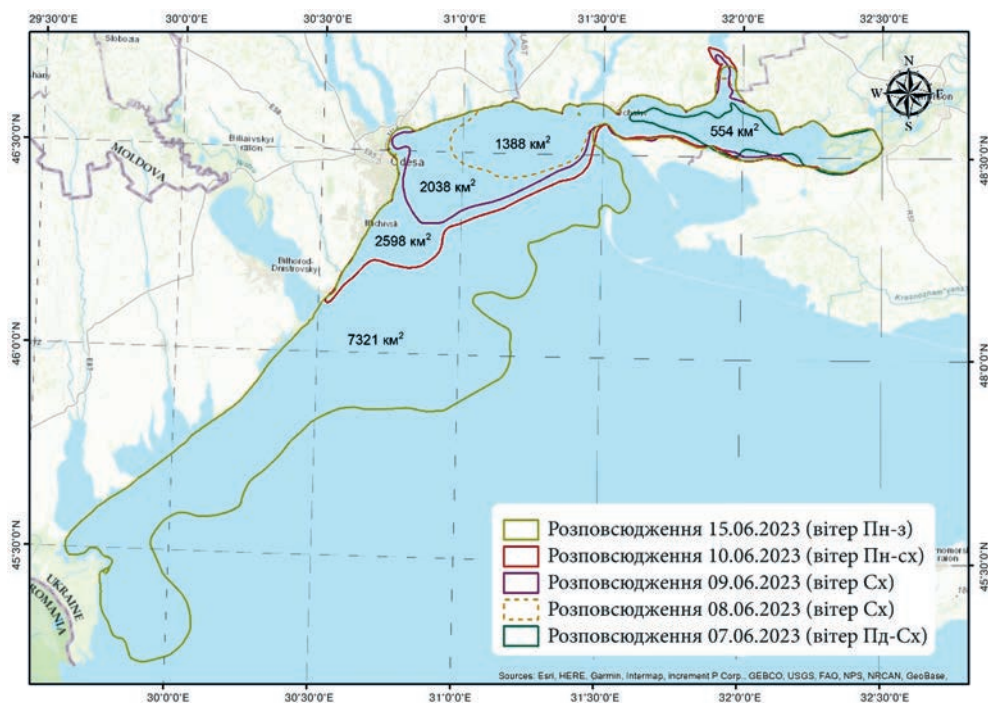


Рис. 4.2. Карта контрольних створів Бузького та Дніпро-Бузького лиманів
Джерело: Український науковий центр екології моря. URL: https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges_explosion_conseq/ (дата звернення: 13.06.2026) [55].

сторової візуалізації антропогенних впливів у прибережній зоні, зокрема на прикладі Миколаївської області. Ключовим завданням побудови такої моделі є комплексна інтеграція даних супутникового дистанційного зондування з наземною статистичною інформацією щодо обсягів скидів, локалізації джерел забруднення та якісних показників водного середовища. Це створює підґрунтя для проведення просторово-часового аналізу екологічного стану морських акваторій та прибережних вод.

Під час формування ГІС-моделі використовуються різномірні вихідні дані, до яких належать координатні та атрибутивні відомості про основні підприємства-водокористувачі, зокрема МКП «Миколаївводоканал», ДАХК «ЧСЗ», ТОВ СП «Нібулон», БГКП «Сирена». Додатково залучається статистична інформація щодо обсягів скидів забруднювальних речовин за період 2015—2022 років (табл. 2.1), а також результати гідрохімічного моніторингу за 2023 рік у контрольних створах Бузького та Дніпро-Бузького лиманів (рис. 4.2, табл. 4.2). Сукупне використання цих даних дає змогу детально проаналізувати просторовий розподіл антропогенних навантажень і їхній вплив на екологічний стан морського середовища.

Як базову картографічну основу в межах дослідження застосовано топографічні карти масштабу 1:200 000, що охоплюють території Одеської, Миколаївської, Херсонської областей та Автономної Республіки Крим, а також векторну батиметричну модель дна Чорного моря. Супутникові матеріали з платформ *Sentinel-2* і *MODIS* інтегруються у геоінформаційну систему у вигляді растрових шарів, які відображають просторовий розподіл концентрації хлорофілу *a*, температурні аномалії поверхневих вод та похідні індекси гідроекологічних характеристик.

У середовищах *ArcGIS* або *QGIS* формуються тематичні шари, що містять адміністративно-територіальний поділ, гідрографічну мережу, батиметрію, точкові об'єкти водокористувачів з відповідними атрибутивними таблицями, а також контрольні створи, використовувані як пункти екологічного спостереження. Для аналізу антропогенного впливу виконується зонування джерел забруднення за величиною скидів із використанням градієнтної кольорової шкали, а також створюються буферні зони, що відображають потенційні області впливу на морське середовище.

Накладення супутникових спектральних даних на карту розміщення забруднювачів забезпечує підвищення достовірності ідентифікації екологічно небезпечних ділянок. У результаті проведеного аналізу встановлено, що найінтенсивніші скиди в Бузький лиман корелюють зі зростанням концентрацій зважених речовин, хлоридів, сульфатів та окремих важких металів. У прибережній зоні міста Очаків виявлено тенденцію до накопичення мінеральних солей і органічних сполук, що узгоджується з функціонуванням портових об'єктів та підвищеним рівнем техногенного навантаження.

Сформована картографічна модель надає можливість не лише фіксувати поточний стан забруднення акваторії, а й здійснювати прогнозування ризиків її подальшої деградації. Отримана інформація має ключове значення для органів державного екологічного контролю, водогосподарських структур, суб'єктів морської інфраструктури; корисна вона й для проведення екологічної експертизи. Просторовий аналіз зон впливу водокористувачів створює основу для ухвалення управлінських рішень, спрямованих на

Таблиця 4.2. Середньорічні концентрації речовин (Миколаївська область)

Місце спостереження	БСК5	Завислі речовини	Амоній	Нітрити	
Бузький лиман, м. Миколаїв (нижче скиду ВАТ «Дамен Шіпярдс Океан»)	1.3	0.4	0.4	0.0	
Дніпро-Бузький лиман, м. Очаків (акваторія морського порту)	1.6	1.0	0.1	0.0	

Джерело: складено за [48].

зниження антропогенного навантаження, оптимізацію режимів скидання, розроблення програм рекультивації та ревіталізації, а також підвищення ефективності реагування у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

Візуалізація результатів у вигляді картографічної моделі забезпечує можливість інтерактивного моніторингу, динамічного накладання шарів у режимі реального часу та оперативного оновлення баз даних у межах єдиного ГІС-середовища. Така модель є базовим елементом системи супутниково-геоінформаційного моніторингу акваторії Чорного моря. Вона поєднує дані дистанційного зондування Землі з результатами польових вимірювань, гідрохімічного аналізу та статистичними показниками, а ще дає змогу сформулювати цілісне уявлення про антропогенне навантаження на морське середовище.

Картографічна модель, реалізована у середовищі геоінформаційних систем і призначена для відображення просторового розміщення джерел забруднення в акваторії Чорного моря, є комплексним інструментом для аналізу, інтерпретації та візуалізації екологічного стану регіону. Така модель інтегрує супутникові дані дистанційного зондування Землі, результати державного моніторингу водних ресурсів і відомості про антропогенне навантаження, що дає змогу сформулювати детальну та просторово узгоджену картину розподілу забруднювальних чинників.

Базою картографічної моделі є цифрова топографічна основа, яка включає векторні шари берегової лінії, батиметрії морського дна та гідрографічної мережі. Зазначені елементи забезпечують точну геоприв'язку даних і слугують опорним каркасом для подальшого просторового аналізу. На цю основу накладаються тематичні шари, що відображають потенційні та фактичні джерела забруднення, зокрема промислові об'єкти, портову інфраструктуру, місця скидання стічних вод та інші елементи, здатні негативно впливати на екологічний стан морського середовища.

Матеріали дистанційного зондування, отримані з супутникових платформ *Sentinel-2*, *Sentinel-3* і *MODIS*, використовуються для ідентифікації аномальних проявів у водному середовищі, як-от зони підвищеної

	Нітрати	Хлориди	Сульфати	Нафтопродукти	Залізо загальне	Мідь	Фосфати
	5.8	4.7	2.3	3.3	0.2	1.9	2.4
	3.6	2.7	1.5	2.3	0.2	14.0	0.4

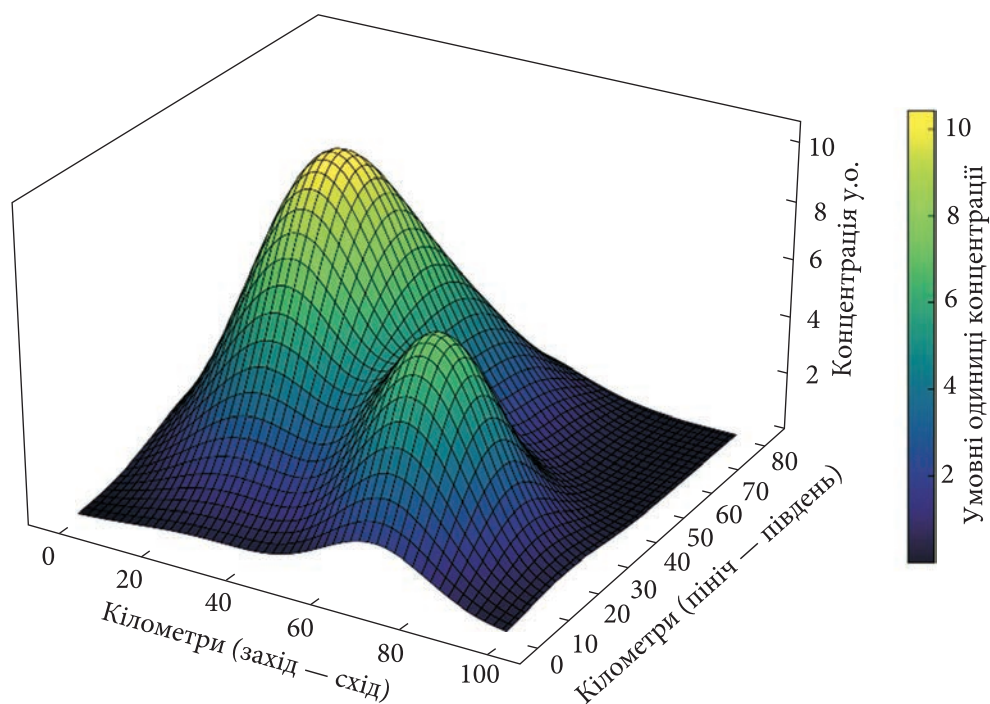


Рис. 4.3. 3D-профіль концентрації забруднення в прибережній зоні Чорного моря
Джерело: наведено за [48].

концентрації хлорофілу *a*, температурні аномалії поверхневих вод і прояви нафтового забруднення. Обробка цих даних здійснюється із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, зокрема *ERDAS IMAGINE*, що забезпечує можливість автоматизованого виділення, класифікації та просторового аналізу зон забруднення.

Відомості щодо обсягів скидів стічних вод і концентрацій забруднювальних речовин, отримані з офіційних статистичних і звітних джерел, інтегруються в геоінформаційну модель у вигляді атрибутивних таблиць, пов'язаних із відповідними просторовими об'єктами. Це створює передумови для проведення просторово-часового аналізу, оцінювання динаміки змін і виявлення тенденцій до погіршення або стабілізації екологічного стану акваторії Чорного моря.

Для просторового аналізу та наочного подання результатів дослідження використовується платформа *ArcGIS*, яка забезпечує інтерактивний доступ до геоінформаційних даних і підтримує побудову багатопланових тематичних карт. Застосування цього інструментарію дає змогу фахівцям у галузі екології, територіального планування та представникам органів державної влади оперативно отримувати актуальну інформацію,

необхідну для обґрунтування управлінських рішень у сфері охорони, відновлення та раціонального використання морського середовища.

Картографічна модель джерел забруднення, реалізована в ГІС для акваторії Чорного моря, є інтегрованою інформаційно-аналітичною системою, що поєднує супутникові матеріали дистанційного зондування Землі, дані державного екологічного моніторингу та інструменти геоінформаційного аналізу. Це дає можливість здійснювати просторову ідентифікацію, оцінювання та наочне відображення джерел антропогенного впливу на морське середовище (рис. 4.3).

Сформована картографічна модель у середовищі ГІС є ефективним засобом моніторингу й управління екологічним станом акваторії Чорного моря, забезпечуючи комплексний підхід до ідентифікації, аналізу та візуалізації джерел забруднення й антропогенного навантаження.

Основою цієї моделі є багатошаровий підхід, де кожен шар представляє окремий аспект екологічного стану:

- гідрографічні шари включають топографічні карти узбережжя, батиметричні дані та гідрологічні особливості, що дає змогу точно відображати фізичні характеристики морського дна та берегової лінії;
- антропогенні джерела забруднення демонструють розташування промислових підприємств, портів, очисних споруд та інших об'єктів, що можуть спричиняти забруднення;
- супутникові дані використовуються для моніторингу параметрів водного середовища, як-от 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 забруднювальних речовин та інші показники, що надаються відповідними органами контролю.

Інтеграція цих шарів у єдину ГІС-модель дає змогу 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.

Розроблення програмного комплексу для каталогізації, зберігання та пошуку космічних знімків Азовського моря

Зазначений підхід є стратегічно важливим етапом впровадження інформаційних технологій дистанційного зондування Землі до системи екологічного моніторингу. Його реалізація забезпечує структурований та централізований доступ до супутникових знімків середньої й високої просторової роздільної здатності, отриманих із різних космічних платформ — NOAA, Terra, SPOT, Landsat, QuickBird та інших. Дані охоплюють значні часові інтервали й широкий спектральний діапазон, що створює надійну інформаційну основу для аналізу стану поверхневих вод, дослідження екологічної динаміки, ідентифікації процесів забруднення та формування сценаріїв сталого природокористування в акваторії Азовського моря.

Ключовим елементом програмно-технологічного комплексу є автоматизована система керування архівом даних ДЗЗ, яка забезпечує ведення нормативно-довідкової інформації, підтримку структури оперативного та довгострокового зберігання, регулярне оновлення електронного каталогу та формування звітних матеріалів. Особливе значення має реалізація надійних механізмів резервного копіювання й відновлення даних, що гарантує збереження цілісності та безперервне функціонування унікального інформаційного ресурсу.

Другим функціональним компонентом системи є модуль роботи з оперативним архівом, який забезпечує завантаження нових супутникових знімків, створення попередніх візуалізацій типу *Quick Look*, введення й редагування метаданих, виконання пошуку за заданими критеріями (дата знімання, тип супутника, територіальне охоплення тощо), а також керування збереженням або видаленням даних. Це дає змогу оперативно обробляти нові інформаційні надходження та приймати обґрунтовані рішення щодо їх подальшого використання.

У довгостроковому архіві акумулюються впорядковані масиви супутникових даних, систематизовані за типами носіїв, форматами зберігання та джерелами отримання. Процес архівування супроводжуваний формуванням картограм — графічних схем просторового покриття територій супутниковими знімками, що суттєво спрощує навігацію в архіві та підвищує ефективність пошуку необхідної інформації.

Інтерфейс користувача програмного комплексу реалізує розширений функціонал взаємодії з растровими супутниковими зображеннями. Він забезпечує відкриття та імпорт файлів, сканування матеріалів, перегляд технічних характеристик знімків і носіїв даних, збереження результатів опрацювання, а також інтеграцію з зовнішніми спеціалізованими програмними засобами оброблення зображень, зокрема ArcGIS, ENVI, Adobe Photoshop та іншими. Важливою особливістю системи є гнучке керування

редагуванням знімків, що передбачає корекцію яскравості й контрастності, застосування просторових і частотних фільтрів, копіювання окремих фрагментів, обертання зображень та збереження отриманих результатів у різних форматах.

Суттєвим інноваційним компонентом програмного комплексу є модуль роботи з векторними картографічними даними, який дає змогу перегляду геопросторових шарів у форматах *.shp*, виконання геоприв'язки растрових зображень, керування легендами тематичних шарів, а також формування й збереження проєктів візуалізації. Це забезпечує коректне накладання векторної інформації на космічні знімки, що є критично важливим для процесів дешифрування, тематичного аналізу та побудови карт екологічного стану територій.

Програмний комплекс підтримує створення та редагування бази даних супутникових знімків, автоматизоване формування звітів за заданими критеріями, інвентаризацію інформаційних ресурсів і супутніх метаданих. Такий підхід сприяє формуванню уніфікованого інформаційного сховища, придатного для подальшого використання в науково-дослідній діяльності, освітніх процесах і системах підтримки управлінських рішень.

Отже, концепція побудови програмного комплексу каталогізації космічних знімків базується на багатофункціональній автоматизованій архітектурі, що інтегрує процеси архівування, пошуку, перегляду, аналізу та візуалізації даних у єдиному інформаційному середовищі. Це дає змогу максимально ефективно використовувати потенціал супутникового моніторингу для дослідження акваторії Азовського моря та його прибережної зони, особливо в умовах зростання екологічного навантаження, інтенсивного господарського освоєння та підвищених ризиків деградації природних водних систем.

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

Тестування архітектур штучного інтелекту для виділення прибережних об'єктів

У процесі дослідження автоматизованого виявлення та дешифрування прибережних об'єктів за супутниковими та аерофотознімками одним із ключових завдань стало тестування архітектур штучного інтелекту, зокрема глибоких нейронних мереж, як-от *CNN (Convolutional Neural Networks)*, *U-Net*, *DeepLab* та їх модифікацій. Ці архітектури є сучасними інструментами в галузі комп'ютерного зору, забезпечують високу точність семантичної сегментації зображень та класифікації об'єктів на знім-

ках, що є особливо актуальним у завданнях екологічного моніторингу прибережних зон.

Класична CNN демонструє надійну продуктивність під час попереднього виділення загальних структур берегової лінії, проте її можливості обмежені у роботі з деталізованими елементами ландшафту, зокрема дрібними водотоками, смугами водоростей, прибережною рослинністю або інфраструктурними об'єктами. 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 високих результатів точності вдалося досягти при використанні архітектур *DeepLabv3+* та їх варіантів, які завдяки використанню атрозійних згорток (*atrous convolution*) і механізмів багатомасштабної агрегації контексту (*ASPP* — *Atrous Spatial Pyramid Pooling*) дають змогу 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 аерофотознімки з БПЛА. Як референсні дані застосовувалися верифіковані вручну карти об'єктів, що дало змогу створити якісні маски для задач семантичної сегментації. Крім того, додаткове підвищення точності досягалося завдяки застосуванню технік аугментації даних (обертання, масштабування, спектральне зміщення) та оптимізації функції втрат, зокрема завдяки використанню 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. Варто акцентувати на гнучкості цих моделей до адаптації під інші завдання — наприклад, виявлення сміттєвих накопичень на береговій лінії, оцінювання зміни берегової смуги чи інтеграцію в ГІС-системи для оперативного управління прибережними територіями.

Результати тестування архітектур CNN, *U-Net* та *DeepLab* підтвердили їх доцільність для завдань екологічного картографування та автоматизованого моніторингу прибережних зон, із перспективою подальшого розширення на інші водні об'єкти — річки, лимани, дельти, порти.

4.3. Розробка інструментів розпізнавання об'єктів та оптимізація обчислювальних ресурсів у завданнях супутникового моніторингу морських акваторій та прибережних зон

Використання графічних процесорів

Застосування графічних процесорів (*GPU*) нині є загальноприйнятим стандартом у процесі розв'язання задач обробки супутникових зображень, особливо у випадках використання методів глибокого навчання. Це стосується, зокрема, згорткових нейронних мереж та їхніх спеціалізованих архітектур (*U-Net*, *DeepLab* тощо), які широко застосовуються для семантичної сегментації берегової лінії та морських об'єктів. Завдяки паралельній обчислювальній архітектурі *GPU* стає можливим одночасне опрацювання мільйонів пікселів, що суттєво скорочує час як навчання моделей, так і виконання інференції. У завданнях супутникового моніторингу великих територій, де необхідний детальний піксельний аналіз (наприклад, в оцінюванні площ забруднених ділянок), використання *GPU* забезпечує продуктивність, яка у десятки разів перевищує можливості традиційних центральних процесорів.

У контексті досліджень екологічного стану Чорного моря залучення графічних процесорів істотно підвищує ефективність оброблення великомасштабних супутникових і гідроєкологічних даних, що надходять з орбітальних платформ, безпілотних літальних апаратів та підводних сенсорних систем. З урахуванням постійного зростання обсягів інформації, отримуваної з таких джерел, як *Sentinel-1*, *Sentinel-2*, *Landsat-8/9*, *MODIS* та інших супутникових систем, застосування *GPU* стає необхідною умовою для забезпечення оперативності аналізу та високої точності результатів моніторингу морських акваторій.

Графічні процесори активно використовуються для високошвидкісного оброблення супутникових знімків у задачах класифікації водної поверхні, виявлення температурних аномалій, картографування процесів цвітіння води та аналізу динаміки берегової лінії. Обчислювальні можливості *GPU* здатні реалізовувати складні моделі глибокого навчання, зокрема *U-Net*, *DeepLab* та *ResNet*, у наближеному до реального часу режимі. Це забезпечує високоточне сегментування та надійне розпізнавання прибережних і морських об'єктів, що є критично важливим для виконання завдань екологічного моніторингу та ухвалення управлінських рішень.

У межах досліджень екологічного стану морських акваторій графічні процесори активно застосовувалися для навчання та практичного використання штучних нейронних мереж, призначених для виявлення нафтових плям, ідентифікації морських суден і аналізу їх траєкторій, а також для моделювання просторово-часового поширення забруднювальних речовин. Завдяки можливості паралельного оброблення великих масивів

зображень GPU забезпечують виконання обчислювальних завдань, які в іншому випадку потребували б надмірних часових ресурсів або були б неможливими для реалізації у близьких до реального часу умовах. Важливу роль у цьому відіграють програмні фреймворки з підтримкою технології CUDA, зокрема *TensorFlow*, *Keras* та *PyTorch*, спроможні ефективно оптимізувати чисельні розрахунки під архітектуру графічних процесорів.

Окрім задач машинного навчання, GPU забезпечують істотне прискорення обчислення екологічних спектральних індексів, як-от NDWI, FAI та NDCI, що широко використовуються для виявлення зон забруднення, процесів евтрофікації, зниження прозорості води та порушень гідробіологічної рівноваги. Використання графічних процесорів у геопросторовому аналізі дає змогу формувати високоточні картографічні представлення індексів у вигляді тайлових або мозаїчних структур, які можуть інтегруватись у візуалізаційні панелі та аналітичні модулі геоінформаційних систем екологічного моніторингу.

Крім того, GPU створюють передумови для реалізації складних гідродинамічних моделей поширення забруднень у Чорному морі, моделей осадоутворення, перенесення тепла та речовин у водних масах. Програмні комплекси типу ROMS або *Delft3D* можуть бути адаптовані до використання графічних процесорів, що може суттєво скоротити час обчислень у моделюванні процесів на великих просторових і часових масштабах. Це критично важливо для розроблення систем раннього попередження про розливи нафти, аварійні скиди забруднювальних речовин або неконтрольоване цвітіння води.

Сучасні підходи до екологічного моніторингу також передбачають активне залучення хмарних обчислювальних платформ із підтримкою GPU, зокрема *Google Earth Engine*, *Amazon Web Services*, *Microsoft Azure* та *NVIDIA GPU Cloud* [44]. Використання таких сервісів дає змогу масштабувати дослідження до регіонального рівня без необхідності створення та підтримки локальних високопродуктивних обчислювальних кластерів, забезпечуючи доступ до потужних інструментів аналізу для наукових установ, екологічних служб і незалежних дослідників.

Паралелізація на рівні CPU-кластерів

Паралельні обчислення на рівні CPU-кластерів є одним із базових елементів побудови масштабованих інформаційних технологій для дослідження акваторій Чорного моря, оскільки забезпечують ефективну обробку значних обсягів екологічних, супутникових і гідрофізичних даних. З огляду на складну динаміку морського середовища, його виражену просторово-часову неоднорідність та залежність від великої кількості природних і антропогенних чинників, використання кластерних обчислю-

вальних систем на основі центральних процесорів (CPU) створює умови для реалізації детальних математичних, гідродинамічних і екологічних моделей з високою просторовою роздільністю та широким територіальним охопленням.

У завданнях супутникового моніторингу Чорного моря паралелізація обчислювальних процесів забезпечує істотне скорочення часу оброблення великомасштабних архівів дистанційного зондування Землі, зокрема з платформ *Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*, *VIIRS* та інших. CPU-кластери забезпечують можливість масової обробки супутникових даних у тайловому форматі з використанням багатопотокових алгоритмів, що дає змогу автоматизувати дешифрування берегової лінії, класифікацію типів підстильної поверхні, побудову карт температури поверхні моря, виявлення нафтових плям і зон інтенсивного цвітіння води, а також візуалізацію характеристик водних мас за показниками прозорості та концентрації хлорофілу.

Паралелізація на рівні CPU-кластерів набуває особливої цінності у моделюванні гідродинамічних процесів — як-от розповсюдження забруднювальних речовин, течій, осадонакопичення, а також у моделюванні впливу кліматичних змін на морські екосистеми.

Відновлення за космічними знімками просторово-часового розподілу скаламучених речовин

Процеси абразії берегів, зони розпріснення морських вод річковим стоком супроводжуються підвищеною концентрацією (порівняно з фоном) зважених речовин техногенного і природного походжень. Кожен з цих типів речовин характеризується селективними поглинанням і відбиванням сонячної радіації. У відповідних спектральних інтервалах просторовий розподіл зважених у морських водах речовин надійно дешифрується на космічних знімках відповідних спектральних інтервалів (рис. 4.4, 4.5).

Особливої наукової та практичної значущості паралельні обчислення на базі CPU-кластерів набувають під час моделювання гідродинамічних процесів у морському середовищі. До таких процесів належать розповсюдження забруднювальних речовин, формування та еволюція морських течій, перенесення й осадонакопичення завислих частинок, а також оцінювання впливу кліматичних змін на функціонування морських екосистем. Реалізація подібних моделей потребує значних обчислювальних ресурсів, оскільки передбачає розв'язання систем диференціальних рівнянь у просторі та часі з високою роздільною здатністю, що ефективно забезпечується саме кластерними CPU-архітектурами.

Одним із важливих прикладних завдань є відновлення просторово-часового розподілу скаламучених речовин у морських водах за даними



Рис. 4.4. Абразія берегів на ділянці Крижанівка — Чорноморське (Одеська область)
Джерело: наведено за [47].

космічних знімків. Процеси берегової абразії, інтенсивного річкового стоку та формування зон розпріснення супроводжуються зростанням концентрації завислих частинок природного й техногенного походження порівняно з фоновими значеннями. Кожен тип таких речовин має характерні спектральні властивості, зокрема селективні особливості поглинання та відбиття сонячного випромінювання.

У відповідних спектральних діапазонах ці відмінності зумовлюють формування контрастного сигналу, що дає змогу надійно дешифрувати просторовий розподіл зважених речовин у морських акваторіях за даними супутникових знімків. Аналіз багатозональних і мультиспектральних матеріалів дистанційного зондування забезпечує можливість виявлення зон підвищеної каламутності, оцінювання масштабів забруднення, що наочно проілюстровано на рис. 4.4, 4.5.

Серія проаналізованих космічних знімків уможливила виявити стійкі тенденції забруднення морських прибережних акваторій. Зокрема,

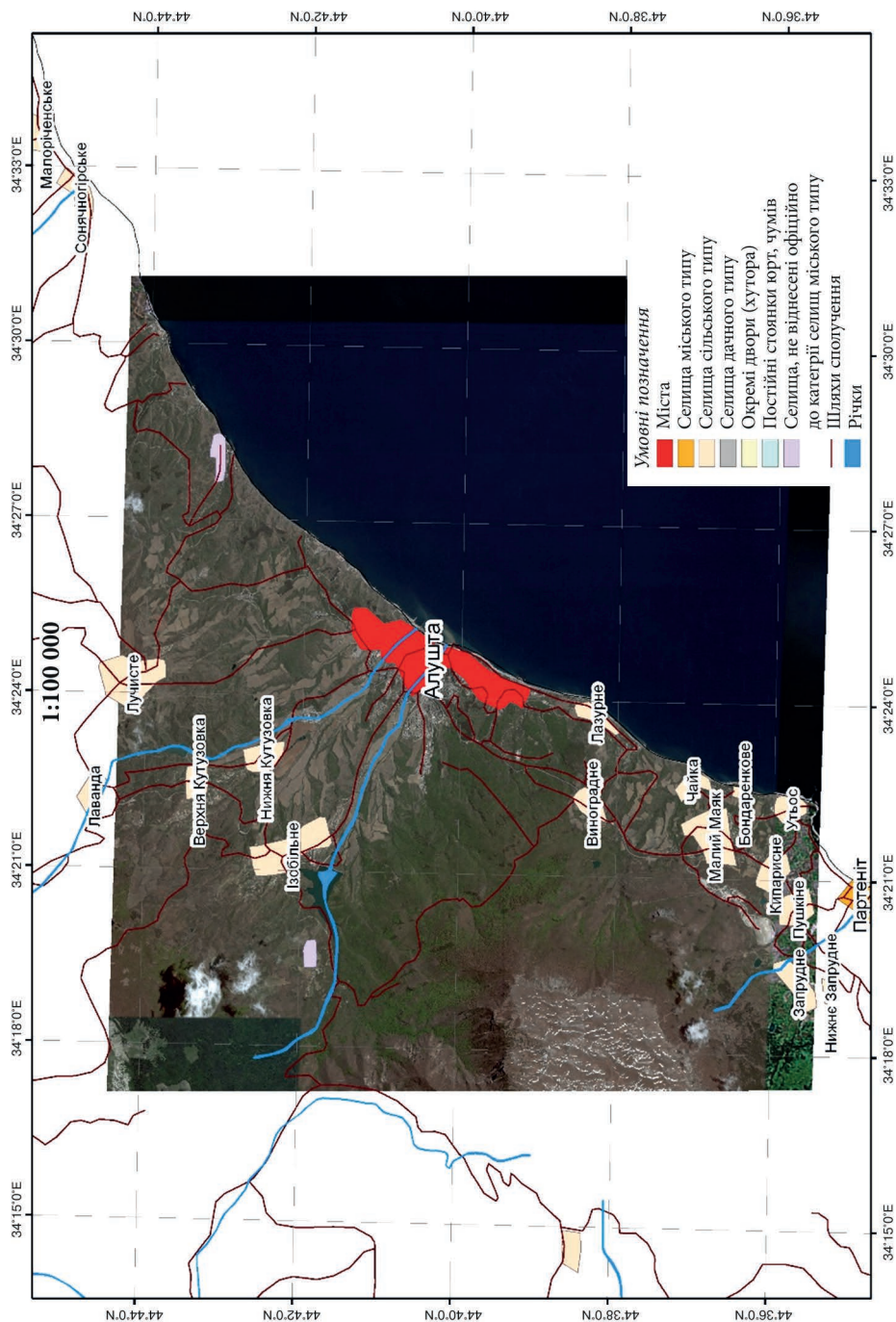


Рис. 4.5. Космічний знімок району Алушти
Джерело: складено автором за даними [50].

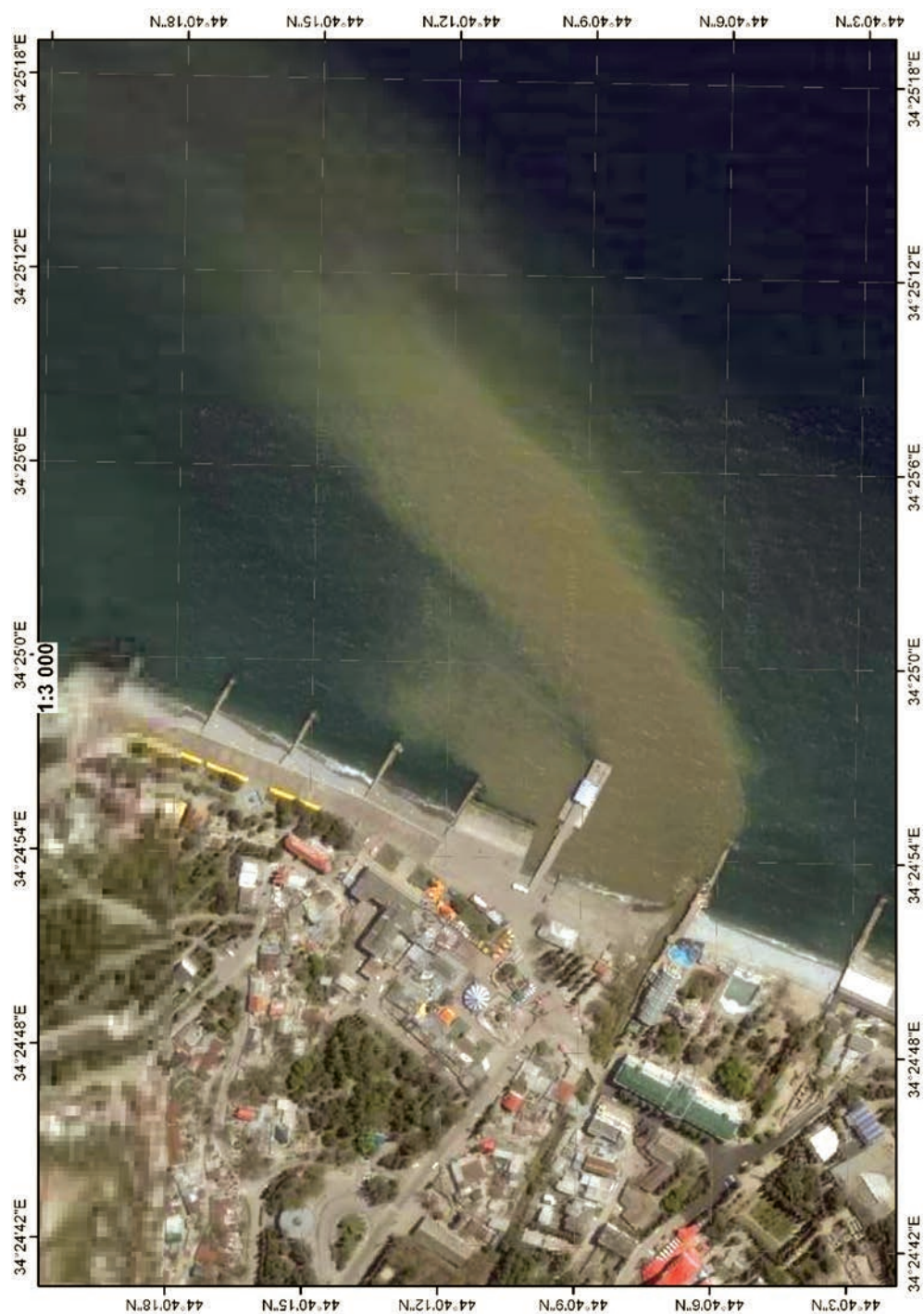


Рис. 4.6. Зона забруднення моря річковим стоком в Алушті
Джерело: складено автором за даними [50].

зона впливу річкового стоку на екологічний стан морських вод у районі м. Алушта була ідентифікована на основі аналізу супутникових зображень, отриманих у різні сезони року. Порівняння матеріалів дистанційного зондування за різні часові інтервали дало змогу простежити сезонну динаміку поширення забруднених водних мас, а також зміну інтенсивності їх впливу на прибережну зону моря. Виявлені особливості просторового розподілу та еволюції зон забруднення показано на рис. 4.6.

Під час реалізації чисельних гідродинамічних моделей, як-от *ROMS* (*Regional Ocean Modeling System*), *Delft3D*, *MIKE 21* або *SCHISM*, обчислювальні модулі та просторові домени можуть бути розподілені між окремими процесорами кластерної системи. Такий підхід забезпечує ефективний розподіл обчислювального навантаження й може відтворювати складні фізичні процеси з високою точністю на масштабі всього басейну Чорного моря [45].

Для таких даних характерні значний обсяг і висока частота оновлення, що зумовлює необхідність створення автоматизованих каналів збору, попередньої фільтрації, агрегування та інтеграції в централізовані бази даних. *CPU*-кластери забезпечують паралельну обробку потоків інформації в режимі реального часу або з мінімальною затримкою, що дає змогу оперативно формувати карти екологічного стану та своєчасно реагувати на потенційно небезпечні ситуації.

У складі інформаційних систем екологічного моніторингу паралельні обчислення на рівні *CPU* забезпечують виконання ресурсоемних геоаналітичних операцій, зокрема просторових накладань, побудови буферних зон, кластеризації екологічних інцидентів і аналізу часових тенденцій. Реалізація таких завдань здійснюється із застосуванням багатопотокових і розподілених середовищ, як-от *OpenMP*, *MPI* (*Message Passing Interface*), *Hadoop*, *Apache Spark*. У процесі формування комплексних моделей екологічних ризиків або систем підтримки ухвалення управлінських рішень для прибережних територій ці технології дають змогу паралельно виконувати десятки аналітичних сценаріїв.

Окрім цього, *CPU*-кластери використовуються для розгортання та підтримки високонавантажених вебплатформ морського моніторингу, що охоплюють публічні картографічні сервіси, інформаційні дашборди з відображенням даних у режимі реального часу та прогностичні платформи оцінки стану прибережних вод. Завдяки паралельній серверній архітектурі такі системи здатні одночасно обслуговувати значну кількість користувачів, забезпечуючи доступ до інтерактивної візуалізації, архівних даних, аналітичних інструментів і звітних матеріалів.

Отже, паралелізація обчислень на рівні *CPU*-кластерів є ключовим компонентом сучасних інформаційних технологій у дослідженнях акваторій Чорного моря. Вона забезпечує масштабованість, надійність і опе-

ративність оброблення екологічних даних, створюючи основу для побудови адаптивних систем моніторингу, прогнозування та управління сталим розвитком морського середовища.

Хмарні платформи обробки

Хмарні платформи посідають ключове місце у сучасних інформаційних технологіях моніторингу акваторій Чорного моря, оскільки забезпечують масштабовану, доступну та ресурсоефективну обробку значних обсягів супутникових, сенсорних і геопросторових даних. Їх використання дає змогу здійснювати аналіз у режимі, близькому до реального часу, або з високою частотою оновлення, що є критично важливим для оцінки динамічних процесів у морському середовищі. У дослідженнях екологічного стану прибережних зон Чорного моря хмарні рішення створюють умови для оптимального використання обчислювальних ресурсів, організації колективного доступу до даних і результатів аналізу, а ще підтримки оперативного ухвалення управлінських та природоохоронних рішень.

Однією з найпоширеніших платформ такого типу є *Google Earth Engine (GEE)* — хмарна геоаналітична система, що надає доступ до великих архівів супутникових зображень (*Landsat*, *Sentinel*, *MODIS* та ін.) із можливістю їх оброблення без потреби локального зберігання даних або використання високопродуктивного апаратного забезпечення. Під час виконання завдань з моніторингу Чорного моря *GEE* спроможна досліджувати просторово-часову мінливість температури поверхні води, концентрацію завислих речовин і хлорофілу, процеси цвітіння води, виявляти нафтові плями та інші прояви антропогенного забруднення, а також аналізувати зміни берегової лінії. Розроблення користувацьких скриптів мовами *JavaScript* або *Python* у середовищі *GEE* забезпечує реалізацію автоматизованих конвеєрів оброблення супутникових сцен, порівняння архівних і актуальних даних, формування карт екологічних ризиків і тематичних індикаторів.

Іншим потужним інструментом є платформа *Microsoft Planetary Computer*, яка надає відкритий доступ до супутникових знімків, екосистемних наборів даних та похідних екологічних індексів. Використання інфраструктури *Azure* забезпечує тісну інтеграцію цієї платформи з сучасними аналітичними середовищами, зокрема *Jupyter Notebook*, *Dask* та *Xarray*, а також підтримку паралельних обчислень. Це особливо актуально для реалізації складних моделей прогнозування стану морських акваторій, аналізу взаємозв'язків між кліматичними чинниками та гідро-екологічними параметрами, для обробки великих масивів даних у багатовимірному просторі.

У дослідженнях екологічного стану Чорного моря надважливу роль відіграють хмарні платформи *Copernicus Open Access Hub* та *WEkEO*, які надають централізований доступ до даних супутникової програми *Copernicus*, зокрема *Sentinel-1*, *Sentinel-2*, *Sentinel-3* та *Sentinel-5P*. Інформація, отримана з цих апаратів, охоплює широкий спектр параметрів, необхідних для аналізу морської поверхні, атмосферних забруднень, біопродуктивності вод та рівнів антропогенного навантаження. Завдяки реалізованим програмним інтерфейсам (*API*) користувачі мають можливість автоматизувати процеси завантаження, попереднього оброблення та аналізу супутникових даних, а також застосовувати стандартні спектральні індекси — *NDWI*, *MCI*, *FAI*, *SST* та інші — для дослідження прибережних і морських процесів.

Окреме місце серед хмарних рішень посідає платформа *Amazon Web Services* (*AWS*), яка пропонує комплекс інструментів для зберігання (*S3*), обчислення (*EC2*, *Lambda*) та аналітичної обробки геопросторової інформації (*SageMaker*, *Athena*, *Redshift*). Хмарні архіви супутникових даних *Landsat* і *Sentinel*, розміщені в середовищі *AWS*, широко застосовуються для виконання обчислювально складних завдань, пов'язаних із аналізом довготривалих змін морських екосистем і оцінкою впливу кліматичних факторів на прибережні території. Залучення інструментів машинного навчання на базі *AWS* дає змогу створювати моделі прогнозування розливів нафтопродуктів, оцінювати інтенсивність берегової ерозії, а ще виявляти сезонні та міжрічні варіації морських течій.

Ключовою перевагою хмарних платформ є їхня здатність до динамічного масштабування відповідно до обсягів вхідних даних і складності аналітичних процедур, що має особливе значення для регіонального та басейнового аналізу акваторії Чорного моря. Крім того, такі рішення сприяють розвитку міжінституційної співпраці, забезпечують дотримання принципів *FAIR* (*Findable*, *Accessible*, *Interoperable*, *Reusable*) у роботі з даними та підтримують концепцію відкритої науки.

Хмарні сервіси також слугують фундаментом для створення веб-ГІС-платформ, призначених для візуалізації результатів екологічного моніторингу морського середовища у формі інтерактивних карт, аналітичних панелей і публічних екологічних сервісів для органів державної влади та широкої громадськості. Інструменти візуалізації, зокрема *Leaflet*, *Mapbox*, *ArcGIS Online* та *Kepler.gl*, дають змогу відображати результати хмарної обробки у зручному інтерфейсі користувача з можливістю фільтрації даних за часовими, просторовими та гідроекологічними параметрами.

4.4. Геоінформаційне картографування заповідно-рекреаційних об'єктів

Природно-ресурсні та рекреаційні компоненти акваторії Чорного моря, особливо в межах української юрисдикції, є важливою складовою екологічного потенціалу та соціально-економічного розвитку прибережних територій. Одним із базових інформаційних джерел, використовуваних для просторового аналізу цих об'єктів, є векторний шар *Reserves.shp*, який містить геопросторову інформацію про наявні та перспективні території природно-заповідного фонду, розташовані вздовж узбережжя Чорного моря та в зоні його прибережної акваторії.

Зазначений шар у форматі *Shapefile (SHP)* є результатом геоінформаційного картографування та відображає просторову локалізацію заповідників, національних природних парків, ландшафтних і морських заказників, заповідних акваторій та інших категорій природоохоронних територій. Просторові межі таких об'єктів представлені у вигляді полігонів, які супроводжуються атрибутивними таблицями з детальними описами, зокрема назвою об'єкта, категорією охорони, площею, роком створення, правовим статусом (чинний або проєктований), функціональним призначенням (природоохоронне чи рекреаційне), а також додатковими екологічними параметрами.

Інтеграція шару *Reserves.shp* у системи супутникового та екологічного моніторингу забезпечує врахування пріоритетів природоохоронної політики в комплексних моделях управління прибережними територіями та акваторією Чорного моря. Це, зокрема, дає змогу оцінювати інтенсивність антропогенного навантаження на екосистеми, виявляти зони підвищеного ризику деградації, аналізувати просторово-часову динаміку рослинного покриву, гідрологічних характеристик і трофічного стану вод у межах або безпосередній близькості до заповідних територій.

Векторний інформаційний шар *Reserves.shp* активно використовується у веб-ГІС-платформах, екологічних аналітичних панелях, системах морського просторового планування (*MSP*), а також у процесі формування стратегій сталого туризму та збереження біорізноманіття. Він охоплює ключові об'єкти природно-заповідного фонду, як-от Дунайський біосферний заповідник, національні природні парки «Джарилгацький», «Білобережжя Святослава», «Тузлівські лимани», «Лебедівка», а також численні заказники й заповідні урочища, що формують каркас екологічної мережі прибережної зони Чорного моря.

Окрім суто природоохоронної функції, зазначені території мають істотне рекреаційне значення. Вони формують і зберігають рекреаційний потенціал прибережних регіонів, забезпечують надання ключових екосистемних послуг, створюють передумови для розвитку екологічного туризму, освітньої діяльності, наукових досліджень та довгострокового



Рис. 4.7. Карта розташування рекреаційних та відпочинкових зон
Джерело: складено за даними [50].

екологічного моніторингу. Збереження таких територій є важливим чинником підтримання сталого балансу між природоохоронними цілями та соціально-економічним розвитком прибережної зони Чорного моря.

З позицій сучасних інформаційних технологій векторний шар *Reserves.shp* може бути ефективно інтегрований із супутниковими даними дистанційного зондування Землі, зокрема з матеріалами знімання *Sentinel-2*. Така інтеграція дає змогу здійснювати кількісну та просторово-часову оцінку змін рослинного покриву, аналізувати стан прибережних ландшафтів, виявляти зони поширення макрофітів і фітопланктону, оцінювати рівень антропогенного й урбанізованого навантаження в межах або поблизу природоохоронних територій.

Застосування просторового шару *Reserves.shp* спроможне не лише візуалізувати поточний стан об'єктів природно-заповідного фонду, але й реалізувати аналітичні та прогностичні сценарії, спрямовані на підтримку ухвалення управлінських рішень щодо збереження екологічної рівноваги, мінімізації антропогенного впливу та адаптації природних систем до змін зовнішнього середовища (рис. 4.7).

**Комбіновані підходи
у дослідженнях Чорноморського регіону**

Вагоме місце у виконаних дослідженнях посіли комбіновані підходи до аналізу морських акваторій і прибережних територій. Їх застосування зумовлене складністю природних процесів у Чорноморському регіоні та необхідністю комплексного врахування різномірних факторів впливу на морське середовище.

Комбіновані підходи, або гібридна інфраструктура дослідження Чорноморського регіону України, розглядаються як інтегрована сукупність методів, технологій і ресурсів, що об'єднують наземні спостереження, супутникові та аерознімальні дані, повітряні платформи, а також інформаційно-аналітичні засоби для всебічного моніторингу, управління та збереження природних ресурсів прибережної зони й морської акваторії. В умовах сучасних екологічних викликів (воєнного впливу, кліматичних змін, деградації природних екосистем та зростання антропогенного навантаження) такі гібридні підходи набувають особливої значущості як у наукових дослідженнях, так і у системі державного екологічного управління.

Базовим принципом гібридної інфраструктури є інтеграція даних різного походження, зокрема мультисенсорних супутникових спостережень, матеріалів з безпілотних літальних апаратів, даних автоматизованих сенсорних мереж, результатів польових вимірювань, адміністративної звітності та елементів громадянської науки. Ці дані поєднуються з обчислювальними платформами нового покоління, серед них хмарні сервіси (*Google Earth Engine*, *Amazon Web Services*, *DIAS*-платформи), локальні високопродуктивні обчислювальні комплекси (*HPC*-кластери), а також мобільні та польові станції збору інформації, що функціонують у межах єдиного інформаційного середовища.

У дослідженнях Чорноморського регіону така гібридна інфраструктура забезпечує реалізацію багаторівневого підходу до спостереження — від мікомасштабного аналізу біофізичних характеристик піщаних кос, лиманів, дюн і берегових схилів до макромасштабної оцінки просторово-часової динаміки температури морської поверхні, концентрації хлорофілу *a*, рівня каламутності вод та виявлення масштабних осередків забруднення. Застосовані у дослідженні супутникові знімки *Sentinel-2* дають змогу відстежувати спектральні та колірні зміни у водному середовищі, натомість дані з безпілотних літальних апаратів забезпечують отримання високодеталізованих зображень берегової лінії, що використовуються для фіксації ерозійних процесів, виявлення несанкціонованої забудови та локалізації стихійних сміттєзвалищ.

Одним із базових компонентів гібридної інфраструктури дослідження є застосування геоінформаційних систем (*QGIS*, *ArcGIS Pro*, *GeoNode*),

що забезпечують інтеграцію різномірних даних, їх просторову прив'язку, картографування та багатовимірний аналіз. Використання такого підходу може поєднувати спектральні індекси супутникових зображень (зокрема *NDWI*, *MCI*, *FAI*), результати гідрологічного та гідродинамічного моделювання, а ще інформацію про просторово-часову динаміку природоохоронних територій, представлену у вигляді векторних шарів (наприклад, *Reserves.shp*), отриманих із кадастрових джерел або відкритих геоінформаційних платформ.

Як уже зазначено вище, важливе місце в межах гібридної інфраструктури посідає використання методів штучного інтелекту, насамперед архітектур глибокого навчання, як-от *CNN*, *U-Net*, *DeepLabv3+*, що застосовуються для автоматизованого розпізнавання типів забруднення, ідентифікації об'єктів інфраструктури, аналізу трансформацій берегової лінії та класифікації прибережних ландшафтів. Реалізація паралельного оброблення великих масивів зображень із використанням графічних процесорів (*GPU*), хмарних віртуальних обчислювальних середовищ та кластерних *CPU*-систем здатне істотно скоротити час аналізу та забезпечити формування адаптивних сценаріїв реагування на екологічні загрози.

Поряд із технологічною складовою, гібридна інфраструктура передбачає розвинені інституційно-організаційні механізми взаємодії. Зокрема, ефективне функціонування системи забезпечується координацією між державними органами (Міністерство економіки, довкілля та сільськогосподарства України, Державна екологічна інспекція України), науковими установами НАН України (наприклад, Інститут морської біології), закладами вищої освіти (Одеський національний університет імені І.І. Мечникова), органами місцевого самоврядування та територіальними громадами, громадськими екологічними організаціями, а також міжнародними партнерами (*EU4Environment*, *UNDP*, *ESA*). Така взаємодія сприяє розширенню інформаційної бази та забезпечує інтеграцію результатів досліджень у процеси ухвалення управлінських рішень на локальному, регіональному й національному рівнях.

В умовах воєнних загроз та післявоєнної відбудови гібридна інфраструктура набуває особливої практичної цінності, оскільки може бути використана для оцінювання екологічних збитків, виявлення потенційно небезпечних ділянок (передусім замінованих територій або зон з ризиком витоків забруднювальних речовин), планування заходів з реабілітації порушених екосистем, збереження природної спадщини та відновлення рекреаційного потенціалу узбережжя Чорного моря.

**Використання контейнеризації
та оркестрації (Docker, Kubernetes)**

Застосування технологій контейнеризації та оркестрації, зокрема *Docker* і *Kubernetes*, є одним із ключових елементів сучасних інформаційних підходів до дослідження морських акваторій і прибережних зон Чорного моря. Використання цих рішень забезпечує стандартизоване, масштабоване та ефективно розгортання екологічно орієнтованих інформаційних систем і аналітичних сервісів, що працюють із великими обсягами супутникових та польових даних. Контейнерні технології підвищують гнучкість обчислювальних процесів, гарантують відтворюваність результатів та значно спрощують інтеграцію складних моделей і геоінформаційних платформ у різних середовищах — від локальних робочих станцій до розподілених хмарних обчислювальних інфраструктур.

Контейнеризація на базі *Docker* дає змогу формувати ізольовані та портативні програмні середовища для виконання завдань екологічного аналізу, зокрема із застосуванням бібліотек машинного навчання (*TensorFlow*, *PyTorch*), а також спеціалізованих геоінформаційних і дистанційно-зондових інструментів (*GDAL*, *QGIS*, *GRASS GIS*, *Orfeo ToolBox*). Такий підхід є особливо актуальним під час оброблення значних масивів супутникових даних (*Sentinel-2*, *Landsat-8*, *MODIS*), які застосовуються для оцінювання температури поверхні моря, концентрації хлорофілу, рівня каламутності, виявлення термічних аномалій, процесів замулення та аналізу берегової ерозії.

Використання *Docker*-контейнерів забезпечує уніфікований підхід до оброблення даних, за якого весь аналітичний ланцюг — від модулів завантаження супутникових сцен і процедур попереднього оброблення (атмосферна корекція, маскування хмарності) до алгоритмів класифікації та семантичної сегментації — формалізується у вигляді коду з чітко визначеними параметрами програмного середовища. Це дає змогу оперативно переносити робочі процеси на нові ділянки спостережень, підвищує відтворюваність наукових результатів і створює передумови для ефективної міжінституційної та міжнародної співпраці.

Система оркестрації *Kubernetes* забезпечує керування та масштабування контейнеризованих застосунків у просторі та часі, що є критично важливим в обробленні великих наборів супутникових даних. Зокрема, вона дає змогу паралельно виконувати аналіз сотень сцен *Sentinel-2* або реалізовувати високочастотний моніторинг температури морської поверхні в майже реальному часі. *Kubernetes* автоматично розподіляє обчислювальні навантаження між вузлами кластера, здійснює контроль працездатності сервісів, забезпечує відмовостійкість, балансування ресурсів та оновлення програмних компонентів без переривання функціонування системи.

У межах досліджень акваторії Чорного моря використання оркестрації контейнерів створює можливість організувати оброблення інформації за принципами мікросервісної архітектури. У такій архітектурі окремі функціональні сервіси відповідають за різні етапи життєвого циклу даних: автоматизоване отримання супутникових матеріалів, виконання процедур попереднього оброблення (зокрема атмосферної корекції із застосуванням програмних засобів *SNAP* або *Sen2Cor*), тематичну інтерпретацію даних (класифікацію зон забруднення, аналіз змін, прогнозування на основі часових рядів), збереження результатів у геопросторових базах даних (*PostGIS*), а ще візуалізацію інформації через вебінтерфейси з використанням бібліотек *Leaflet*, *OpenLayers* або *Mapbox GL*.

Контейнеризовані обчислювальні пайплайни забезпечують можливість гнучкої інтеграції зовнішніх сервісів і програмних інтерфейсів, зокрема *Copernicus Open Access Hub*, *Google Earth Engine* чи *Amazon Sentinel Hub*. Це дає змогу працювати безпосередньо з розподіленими супутниковими архівами без необхідності локального зберігання значних обсягів даних. Цей підхід є особливо важливим для аналізу прибережних екосистем, де критичним чинником виступає не лише точність, а й швидкість отримання результатів — наприклад, у випадках аварійних скидів забруднювальних речовин, розливів нафти або фіксації небезпечних температурних аномалій у морській воді.

Застосування контейнеризації та оркестрації створює умови для паралельної роботи мультидисциплінарних команд, до складу яких входять науковці, аналітики, екологи і представники органів управління. Учасники процесу можуть одночасно взаємодіяти з єдиною інформаційною системою, використовуючи різні канали доступу — командний рядок (*CLI*), *REST API* або вебпортали — за наявності диференційованих прав доступу, але з уніфікованими алгоритмами оброблення та спільною геопросторовою базою даних.

У довгостроковій перспективі впровадження контейнерних і оркестраційних технологій формує технологічне підґрунтя для створення національної платформи екологічного моніторингу Чорного моря. Така платформа здатна в режимі, близькому до реального часу, здійснювати збір, оброблення, зберігання та візуалізацію даних про стан морського середовища, забезпечуючи науково обґрунтовану підтримку процесів ухвалення управлінських рішень і формування екологічної політики. Окрім цього, подібні системи можуть слугувати інструментом транскордонної взаємодії між країнами Чорноморського регіону з питань обміну екологічною інформацією, координації природоохоронних заходів та реагування на надзвичайні екологічні ситуації.

4.5. Оптимізація чинників техногенного навантаження на прибережні води

Зменшення обчислювального навантаження завдяки оптимізації моделей

Зниження обчислювального навантаження під час виконання завдань автоматизованого розпізнавання об'єктів прибережних територій є одним із ключових чинників ефективності супутникового та аерокосмічного моніторингу. Особливої актуальності ця проблема набуває в умовах обмежених апаратних ресурсів, необхідності оперативного реагування або роботи в режимі, близькому до реального часу. Такі завдання, як правило, пов'язані з обробленням великих масивів зображень високої просторової роздільності, отриманих із супутникових платформ *Sentinel*, *Landsat*, *WorldView*, а також із безпілотних літальних апаратів, з метою виявлення екологічно чутливих об'єктів — нафтових плям, змін берегової лінії, рослинного покриву, елементів інфраструктури чи фактів несанкціонованої забудови.

Одним із базових напрямів оптимізації є застосування спрощених архітектур глибоких нейронних мереж, орієнтованих на зменшене енергоспоживання та швидку інференцію. До таких архітектур належать *MobileNet*, *EfficientNet-Lite*, *Tiny-YOLO*, спроєктовані для роботи в умовах обмежених обчислювальних можливостей або для оброблення поточних даних у реальному часі. Використання подібних моделей дає змогу досягти прийняттого компромісу між швидкістю та точністю, достатньою для практичних завдань екологічного моніторингу.

Додаткове зменшення ресурсомісткості досягається шляхом застосування методів квантування та прунінгу нейронних мереж. Квантування передбачає перехід від чисел з рухомою комою високої точності до менш розрядних представлень (наприклад, 8-бітних цілочисельних), що суттєво знижує потреби в оперативній пам'яті та прискорює обчислення. Прунінг, зі свого боку, базується на видаленні малозначущих ваг і зв'язків у мережі, зменшуючи кількість параметрів без істотного погіршення якості результатів.

Важливим практичним підходом є також організація пакетного оброблення даних із використанням стратегій інтелектуального поділу великих супутникових сцен на тайли. Це дає змогу зменшити обсяг інформації, що обробляється за одну ітерацію, зберігаючи просторовий контекст аналізу. У поєднанні з механізмами кешування проміжних результатів та використанням розподілених черг обчислень (зокрема *Apache Kafka*, *Celery*), такий підхід істотно знижує пікове навантаження на систему та підвищує пропускну здатність під час роботи з потоковими даними.

Суттєву роль у зменшенні обчислювальних витрат відіграє застосування попередньо навчених моделей та їх адаптація (*fine-tuning*) на спеціалізованих наборах даних, характерних для Чорноморського регіону. Це дає змогу уникнути повного циклу навчання нейронних мереж із нуля та отримувати стабільні результати за значно менших часових і апаратних витрат.

Крім того, оптимізація процесів розгортання моделей із використанням контейнерних технологій (*Docker*) та легковагових середовищ виконання, зокрема *ONNX Runtime* або *TensorRT*, забезпечує ефективне масштабування аналітичних рішень як на периферійних (*edge*) пристроях, так і у хмарній інфраструктурі, підвищуючи гнучкість і відмовостійкість системи.

Отже, комплексне застосування наведених підходів дає змогу сформувати збалансоване рішення, що поєднує точність розпізнавання, високу швидкість оброблення та раціональне використання обчислювальних ресурсів. Це критично важливо для систем екологічного моніторингу прибережних зон, особливо в умовах воєнного часу, обмеженого фінансування або необхідності автоматизованого контролю великих за площею територій.

Оптимізація факторів техногенного навантаження на прибережні води північно-західної акваторії Чорного моря належить до пріоритетних завдань забезпечення екологічної безпеки та впровадження принципів сталого управління морськими ресурсами України. Зазначений регіон характеризується підвищеною вразливістю до антропогенних впливів, що зумовлено значною концентрацією портово-транспортної, промислової, аграрної та рекреаційної діяльності, високою щільністю міської забудови, а також функціонуванням великих річкових систем — Дунаю, Дністра та Південного Бугу, які є основними транзитними каналами надходження забруднювальних речовин із внутрішніх територій країни до морського середовища.

Одним із базових напрямів зниження техногенного тиску є системна ідентифікація та типологізація основних джерел антропогенного забруднення. Такими джерелами є промислові та комунальні стічні води, скиди з меліоративних і зрошувальних систем, портова та судноплавна діяльність, аварійні розливи нафтопродуктів, експлуатаційні викиди з морських суден, а також рекреаційне навантаження у прибережній зоні. Ефективне зменшення негативного впливу цих чинників потребує розроблення адресних управлінських і технологічних заходів, адаптованих до конкретних природних умов та екосистемних особливостей узбережжя.

Ключову роль у процесі оптимізації моніторингу техногенного навантаження відіграють сучасні інформаційні технології. Інтегроване застосування геоінформаційних систем, методів дистанційного зондуван-

ня Землі, супутникових даних (*Sentinel-2*, *Landsat*, *MODIS*) та матеріалів, отриманих із безпілотних літальних апаратів, забезпечує можливість оперативного виявлення зон підвищеного забруднення, змін оптичних характеристик води, термічних аномалій, нафтових плям, процесів евтрофікації та трансформацій берегової лінії. Високу ефективність демонструє використання алгоритмів автоматизованої класифікації та машинного навчання (як-от *Random Forest*, *Support Vector Machine*, згорткових нейронних мереж) для тематичного дешифрування супутникових знімків і просторового аналізу джерел забруднення.

Окремий напрям оптимізації пов'язаний із контролем та регулюванням скидів стічних вод шляхом впровадження сучасних технологій попереднього очищення та постійного моніторингу ефективності роботи очисних споруд. Для цього доцільно використовувати сенсорні системи, що забезпечують безперервну реєстрацію концентрацій органічних сполук, фосфатів, важких металів, амонійного азоту та нафтопродуктів. Отримані дані інтегруються в інформаційно-аналітичні платформи, які дають змогу здійснювати моделювання сценаріїв поширення забруднювальних речовин з урахуванням гідродинамічних умов, вітрових режимів, течій і температурних характеристик водного середовища.

Важливим напрямом у системі зниження техногенного навантаження є оцінювання та моделювання ризиків для біорізноманіття, насамперед у межах заповідних морських акваторій, районів нересту та місць гніздування водних і прибережних видів. Поєднання екологічного та гідродинамічного моделювання (з використанням програмних комплексів *Delft3D*, *MIKE 21* та аналогічних систем) із просторовими геоінформаційними даними створює можливість прогнозувати наслідки антропогенних впливів на найбільш чутливі компоненти морських екосистем. Отримані модельні результати формують наукове підґрунтя для ухвалення регуляторних рішень, просторового зонування акваторій, встановлення обмежень на судноплавство чи скиди, а також розроблення сценаріїв дій у разі аварійних ситуацій.

Суттєвим елементом оптимізації є впровадження цифрових екологічних паспортів для ключових промислових, портових і транспортних об'єктів, що здійснюють діяльність у прибережній зоні.

Вагомий потенціал для підвищення ефективності спостережень має розвиток механізмів громадського екологічного моніторингу з використанням мобільних застосунків і відкритих цифрових платформ. Залучення туристів, рибалок, місцевих мешканців та екологічних активістів до фіксації випадків локальних забруднень, погіршення стану пляжів, появи плівок або піни на поверхні води із фото- та геоприв'язкою дає змогу суттєво доповнити офіційні системи спостереження та підвищити просторову деталізацію моніторингової інформації.

В умовах збройного конфлікту особливої уваги потребують ризики, пов'язані з ушкодженням критичної інфраструктури — очисних споруд, нафтотерміналів, портових і військових об'єктів, руйнування яких може спричиняти аварійні скиди токсичних речовин у морське середовище. Для мінімізації наслідків таких подій необхідним є формування системи оперативного реагування на регіональному рівні, що передбачає використання супутникового моніторингу, мобільних лабораторій та заздалегідь визначених протоколів дій органів екологічної безпеки.

Отже, оптимізація техногенного навантаження на північно-західну частину узбережжя Чорного моря є багатокомпонентним процесом, який потребує інтеграції технологічних, управлінських, правових і науково-аналітичних інструментів. Реалізація такого комплексного підходу створює передумови для збереження екосистемної рівноваги, підвищення рівня екологічної безпеки та забезпечення сталого розвитку морського регіону України.

Висновок

Обґрунтовано принципи побудови інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу морського середовища, яка базується на поєднанні супутникових технологій дистанційного зондування Землі, геоінформаційних систем, методів штучного інтелекту та високопродуктивних обчислювальних платформ. Реалізація такого підходу дала змогу сформувати багаторівневу архітектуру моніторингу акваторій Чорного та Азовського морів.

У роботі проведено аналіз тактико-технічних характеристик та можливостей радіолокаційних та оптико-електронних засобів спостереження за морською обстановкою з використанням даних супутникової зйомки, доступних для використання в Україні.

Розроблено програмний комплекс для тематичного дешифрування супутникових знімків, що забезпечує автоматизовану векторизацію плямистих структур та екологічну інтерпретацію забруднень у поєднанні з атрибутивними базами даних державного моніторингу та інформацією про водокористувачів. Побудовані векторні топографічні та батиметричні карти Чорного моря сформували просторову основу для ГІС-моделювання екологічної ситуації. Запропоновано методику використання сучасних нейромережевих архітектур (*U-Net*, *DeepLabv3+*) для автоматизованого виявлення прибережних об'єктів і зон забруднення. За результатами експериментальних досліджень досягнуто високих показників точності сегментації (*IoU* у межах 0,82—0,88) під час оброблення реальних супутникових знімків *Sentinel-2* та аерофотознімків з БПЛА.

Підготовлено алгоритм розрахунку імовірності ідентифікації кораблів за даними супутникової зйомки.

Розроблено інструментарій оптимізації обчислювальних процесів із використанням *GPU* та *CPU*-кластерів, що забезпечує паралельну обробку великих масивів даних і суттєве прискорення навчання та застосування моделей семантичної сегментації. Ефективність підходу підтверджено під час реалізації сценаріїв оперативного моніторингу забруднень і моделювання поширення речовин у морському середовищі.

Створено програмний комплекс для каталогізації та оброблення архівів супутникових знімків Азовського моря з підтримкою інтеграції в середовища *ArcGIS*, *QGIS* та *ENVI*, що забезпечує автоматизоване завантаження, пошук, обробку та візуалізацію просторової інформації. Доведено доцільність і ефективність використання хмарних платформ (*Google Earth Engine*, *Microsoft Planetary Computer*, *Copernicus DIAS*) як базового середовища для реалізації інформаційного моніторингу морських акваторій, з можливістю створення автоматизованих сценаріїв обробки на основі *API* та доступу до багаторічних супутникових архівів. У ГІС-модель інтегровано просторові дані про природоохоронні та рекреаційні об'єкти, що дало змогу здійснювати зонування акваторій, просторово-часовий аналіз динаміки змін, екологічне прогнозування та оптимізацію навантаження на чутливі екосистеми в умовах зростання антропогенного тиску та воєнних ризиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даник, Ю.В., & Бугайов, М.В. (2015). Аналіз ефективності виявлення тактичних безпілотних літальних апаратів пасивними та активними засобами спостереження. *Збірник наукових праць ЖВІ ДУТ. Інформаційні системи*, (10), 5—20.
2. Машков, О.А., Триснюк, В.М., Мамчур, Ю.В., Жукаускас, С.В., Нігородова, С.А., & Курило, А.В. (2019). Новий підхід до синтезу відновлювального керування для дистанційно пілотованих літальних апаратів екологічного моніторингу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, (1), 69—75.
3. Зайцев, С.В., Приступа, В.В., & Василенко, В.М. (2013). Оцінювання завадозахищеності безпроводних мереж із сигналами OFDM з внутрібітовою псевдовипадковою перебудовою піднесучих частот. *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, (2), 192—202.
4. Красовський, Г.Я. (2008). *Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій*. Інтертехнологія.
5. Готов, В., & Церклевич, А. (2014). Аналіз і перспективи аерознімання з безпілотного літального апарата. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (1), 131—136.
6. Харченко, О. В., & Богославець, С. О. (2013). Розвідувальні безпілотні авіаційні комплекси у єдиній системі повітряного спостереження в Україні. *Збірник наукових праць державного науково-дослідного інституту авіації*, (16), 6—12.
7. Зайцев, С.В., Казимир, В.В., Василенко, В.М., & Яриловец, А.В. (2018). Адаптивный выбор параметров S-случайного перемещителя в беспроводных системах передачи данных с турбокодированием. *Радиоэлектроника. Известия высших учебных заведений*, 61(1), 22—33.
8. Красовський, Г.Я. (2006). *Розробка макету програмного модуля космічного моніторингу морської поверхні за даними оптичних засобів* (Звіт з НДР № ДР 0107U000564). Інститут телекомунікацій та глобального інформаційного простору.
9. Красовський, Г.Я., Андреев, С.М., Крета, Д.Л., & Радчук, В.В. (2009). Технологія векторизації растрових карт просторових даних глибин Азовського моря. У: *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Збірник наукових праць VIII Міжнародної науково-практичної конференції*. С. 78—87.

10. Трофимчук, О.М., Красовський, Г.Я., Крета, Д.Л., & Андреев, С.М. та ін. (2010). Структура банків космічних знімків ГІС управління охороною морських територіальних вод України. *Учені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Географія*, 23(2), 271—279.
11. Трофимчук, О.М., Василенко, В.М., & Зайцев, С.В. (2018). Аналіз систем автоматичного запиту на повторну передачу. *Математичне моделювання в економіці*, 3(12), 41—51.
12. Довгий, С.О., Красовський, Г.Я., & Радчук, В.В. (Ред.). (2010). *Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря*. Інформаційні технології.
13. Василенко, В.М., Зайцев, С.В., Лівенцев, С.П., & Дунай, В.П. (2016). Адаптація s-випадкового перемежувача кодеків турбокоду. У: *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Збірник наукових праць XV Міжнародної науково-практичної конференції*. С. 189—192. НАН України.
14. Триснюк, В.М., Охарев, В.О., Триснюк, Т.В., Сметанін, К.В., & Курило, А.В. (2018). Створення системи мобільного екологічного моніторингу. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*, (2), 120—128.
15. Триснюк, В.М., Зорін, Д.О., & Волинець, Т.В. (2024). Інформаційні системи мобільного екологічного моніторингу Дністровського каньйону. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, (2), 60—68. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.027280>
16. Крета, Д.Л., Анпілова, Є.С., Клименко, В.І., & Трофимчук, О.М. (2014). Просторовий аналіз розповсюдження забруднень поверхневих вод і ґрунтів засобами ДЗЗ та ГІС. *Екологічна безпека та природокористування*, (14), 59—69.
17. Trofymchuk, O., Kreta, D., Myrontsov, M., Okhariev, V., Shumeiko, V., & Zagorodnia, S. (2015). Information technology in environmental monitoring for territorial system ecological assessment. *Journal of Environmental Space and Engineering A*, 4(2), 79—84.
18. Перегуда, О.М., Родіонов, А.В., Федорчук, Д.Л., Журавський, С.В., Конвісар, М.Г. ... & Триснюк, Т.В. (2024). Розроблення методу комплексного формування набору даних та вибору моделі для розпізнавання технічного стану безпілотного літального апарата. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(4), 42—51. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.312968>
19. Трофимчук, О.М., Триснюк, В.М., Анпілова, Є.С., Бутенко, О.С., Вишняков, В.Ю. ... & Шумейко, В.О. (2022). *Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування* [Монографія]. Супрун В.П.
20. Триснюк, В.М., & Єгоров, В.О. (2022). Автоматизований пристрій керування антеною для системи супутникового радіомоніторингу. У: *Матеріали 21-ї міжнародної науково-практичної конференції*. С. 181—183.
21. Трофимчук, О., Загородня, С., Вишняков, В., Клименко, В., Шевякіна, Н. ... & Сластін, С. (2023). Космічний моніторинг порушення стану екосистеми Чорноморського біосферного заповідника внаслідок військових дій. *Екологічна безпека та природокористування*, 47(3), 94—112. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.94-112>
22. Марущак, В.М., Волинець, Т.В., Зотова, Л.В., & Хабова, Н.В. (2024). Виклики при створенні комплексної математичної моделі електронного документообі-

- гу. У: С.О. Довгий (Ред.). *Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для перемоги та відновлення: Матеріали 23-ї міжнародної науково-практичної конференції*. С. 60—61.
23. Сметанін, К.В., Волинець, Т.В., & Марущак, В.М. (2024). Застосування математичних методів для виявлення та запобігання кіберзагрозам. У: С.О. Довгий (Ред.). *Математичне моделювання та інформаційно-комунікаційні технології для зміцнення та відновлення: Матеріали 23-ї міжнародної науково-практичної конференції*. С. 36—38.
24. Анпілова, Є.С., Клименко, В.І., Новохатська, Н.А., & Крета, Д.Л. (2015). Використання геоінформаційних систем та дистанційного зондування для створення картографічних моделей оцінки якості ґрунтів та поверхневих вод. У: *Роль агроекологічної оцінки земель у розвитку регіонів та охороні екологічної рівноваги: Матеріали міжнародного семінару*. С. 59—61.
25. Крета, Д.Л. (2016). Інформаційні технології аналізу та оцінки забруднення компонентів навколишнього середовища. *Математичне моделювання в економіці*, (3—4), 45—58.
26. Триснюк, Т.В., Тимчук, В.Ю., Волинець, Т.В., & Дзюба, В.А. (2024). Відновлювальні заходи наслідків воєнних дій та техногенних катастроф в Україні. У: *Актуальні проблеми та інноваційні технології в гуманітарному розминуванні, цивільному захисті, критичній інфраструктурі та екологічній безпеці для повоєнного відновлення України: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції*. С. 80—90.
27. Триснюк, Т.В., Шумейко, В.О., & Волинець, Т.В. (2024). Аерокосмічні технології оцінки забруднення територій, пов'язаного з видобутком мінеральних ресурсів. У: *Матеріали 9-ї міжнародної науково-практичної конференції*. С. 496—501.
28. Шумейко, В.О., Мосійчук, Д.І., Сметанін, К.В., Волинець, Т.В., & Марущак, В.М. (2023). Застосування безпілотних систем в інтересах національної безпеки та оборони. У: С.О. Довгий (Ред.). *Матеріали 22-ї міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток»*. С. 102—104.
29. Триснюк, Т.В., Конецька, О.О., Нагорний, Є.І., Марущак, В.М., Волинець, Т.В., & Приступа, В.В. (2023). Оцінка радіаційного ризику забруднення навколишнього середовища для населення внаслідок воєнних дій. У: *Виклики та загрози критичній інфраструктурі*. С. 163—167.
30. Волинець, Т.В., & Марущак, В.М. (2023). Визначення вектора параметрів руху космічних об'єктів у великобазовій багатопозиційній оптичній системі. У: *Матеріали 28-ї міжнародної науково-практичної конференції*. С. 333—335.
31. Крета, Д.Л., Анпілова, Є.С., Зогородня, С.А., & Клименко, В.І. (2011). Методологія досліджень озера Світязь із застосуванням геоінформаційних систем і технологій дистанційного зондування Землі. У: *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Збірник наукових праць X Міжнародної науково-практичної конференції*. С. 145—152.
32. Шумейко, В.О., Триснюк, Т.В., Волинець, Т.В., Марущак, В.М., & Дзюба, В.А. (2024). Інформаційне забезпечення систем екологічного моніторингу транскордонних впливів. У: *Матеріали IX Міжнародного з'їзду екологів*. С. 265—267.

33. Радчук, І.В., Клименко, В.І., & Крета, Д.Л. (2012). Космічний моніторинг екологічного стану озера Нобель. У: *Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: Збірник наукових праць XI Міжнародної науково-практичної конференції*. С. 133—138.
34. Пащенко, Р.Е., Радчук, В.В., & Красовський, Г.Я. (2013). *Моніторинг навколишнього середовища з використанням космічних знімків супутника NOAA* (С.О. Довгий, Ред.) [Монографія]. Інформаційні технології.
35. Романюк, В.П., Триснюк, В.М., & Куртсеїтов, Т.Л. (2020). Постановка задач ліквідації наслідків природних та техногенних катастроф на території України. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 3(61), 138—142.
36. Волинець, Т.В. (2024). Інформаційні системи мобільного моніторингу морських акваторій та прибережних зон. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, 4(85), 53—61. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.049231>
37. 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>
38. 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>
39. Щипцов, А., Крета, Д.Л., Лебідь, О.Г., & Шевякіна, Н.А. (2020). Використання результатів дистанційного зондування Землі в задачах моніторингу навігаційно-гідрографічної обстановки. *Екологічна безпека та природокористування*, 36(4), 66—76. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2020.4.66-76>
40. Триснюк, В.М., & Марущак, В.М. (2024). Інформаційні технології для візуалізації та обробки даних у сфері геопросторової розвідки. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, 4(83), 80—88. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.027280>
41. Волинець, Т.В., & Мосійчук, Д.І. (2025). Інформаційні системи спостереження морських акваторій та прилеглих зон з використанням аерокосмічних технологій. *Екологічна безпека та природокористування*, 1(53), 146—155. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.146-154>
42. Красовський, Г.Я. (2008). *Космічний моніторинг безпеки водних екосистем із застосуванням геоінформаційних технологій*. Інтертехнологія.
43. Trofymchuk, O.M., Shevyakina, N.A., Klymenko, V.I., Vyshnyakov, V.Y., & Tomchenko, O.V. (2022). Detection of thermal anomalies due to military actions in Ukraine using remote sensing methods. У: *XXII SGEM GeoConference 2022*. <https://doi.org/10.5593/sgem2022/2.1/s10.35>
44. Trysnyuk, V., Trysnyuk, T., Nikitin, A., Kurylo, A., & Demydenko, O. (2021). Geomodels of space monitoring of water bodies. *E3S Web of Conferences*, 280, 09016. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128009016>
45. Зайцев, С.В. (2016). *Методи та моделі забезпечення сталої достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних*. Чернігівський національний технологічний університет.

46. Скидан, О.В., Даник, Ю.Г., & Федонюк, Т.П. та ін. (ред.). (2022). *Космічне та геоінформаційне забезпечення прийняття рішень у ключових сферах національної безпеки і оборони України*. Поліський національний університет.
47. Довгий, С.О., Красовський, Г.Я., & Радчук, В.В. та ін. (ред.). (2010). *Сучасні інформаційні технології екологічного моніторингу Чорного моря*. Інформаційні системи.
48. Геоінформаційні дослідження водних екосистем України: моніторинг та прогнозування (2022). Супрун В.П.
49. Фещенко, В.П. (ред.). (2016). *Раціональне використання та відновлення водних ресурсів*. Вид-во ЖДУ ім. І. Франка.
50. ESRI. (2026). *ArcGIS Online* (Cloud GIS platform). <https://www.arcgis.com>
51. Fingas, M.F., & Brown, C.E. (2018). A review of oil spill remote sensing. *Sensors*, 18(1), Art. 91. <https://doi.org/10.3390/s18010091>
52. Fingas, M.F., & Brown, C.E. (2014). Review of oil spill remote sensing. *Marine Pollution Bulletin*, 83(1), 9—3. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.03.059>
53. Fingas, M.F. (Ed.). (2011). *Oil spill science and technology*. Elsevier.
54. National Centers for Environmental Information. (n.d.). *Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) Data*. NOAA. <https://www.ncei.noaa.gov/>
55. Український науковий центр екології моря. (2023, 27 черв.). Забруднення Чорного моря як наслідок аварійної ситуації, яка склалася після підриву греблі Каховської ГЕС. https://sea.gov.ua/index.php/2023/06/27/ges_explosion_conseq/
56. Довгий, С.О., Лялько, В.І., Бабійчук, С.М., Кучма, Т.Л., Томченко, О.В., & Юрків, Л.Я. (2019). *Основи дистанційного зондування Землі: історія та практичне застосування*.

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ ТА СКОРОЧЕННЯ

БПЛА	—	безпілотні літальні апарати
ГІС	—	геоінформаційна система
ГІТ	—	геоінформаційні технології
ДЗЗ	—	дистанційне зондування Землі
ІЧ	—	інфрачервоне випромінювання
КДВ	—	коефіцієнт дифузного відбиття
КДзВ	—	коефіцієнт дзеркального відбиття
МН	—	машинне навчання
НВЧ	—	надвисокі частоти
ПГХ	—	первинні гідрооптичні характеристики
САР	—	синтезована апертура радару
ШІ	—	штучний інтелект
ADCP	—	Acoustic Doppler Current Profiler
FUI	—	Floating Unnatural Index
NDVI	—	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	—	Normalized Difference Water Index
SAR	—	Synthetic Aperture Radar

Наукове видання

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ НАН УКРАЇНИ

ТРОФИМЧУК Олександр Миколайович
ТРИСНЮК Василь Миколайович
ВОЛИНЕЦЬ Тарас Васильович
ВИШНЯКОВ Вячеслав Юрійович

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ
ТА АЕРОКОСМІЧНІ
ТЕХНОЛОГІЇ
ДОСЛІДЖЕННЯ
МОРСЬКИХ
І ПРИБЕРЕЖНИХ
ЕКОСИСТЕМ**

Редактор *Дмитро Шулікін*
Художнє оформлення *Євгена Ільницького*
Технічний редактор *Тетяна Шендерович*
Виготовлення ілюстрацій *Оксана Цікало*
Верстка *Ніни Кучеренко*

Підписано до друку 06.08.2026. Формат 70 × 100/16.
Гарн. Minion Pro. Ум. друк. арк. 11,70. Обл.-вид. арк. 10,76.
Тираж 100 прим. Зам. № 8136

Видавець і виготовлювач
Видавничий дім «Академперіодика» НАН України
вул. Терещенківська, 4, Київ, 01024, Україна

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів
видавничої справи серії ДК № 544 від 27.07.2001

