

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет біології, географії та екології

Кафедра географії та екології

**ДИСТАНЦІЙНИЙ АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЙНИХ
ТЕНДЕНЦІЙ СУХОЇ КОСИ (ЧОРНЕ МОРЕ,
УКРАЇНА)**

Кваліфікаційна робота (проект)

на здобуття ступеня вищої освіти «магістр»

Виконав: здобувач 2 курсу, 05-213М групи

Спеціальності 103 Науки про Землю

Освітньо-наукової програми

«Науки про Землю»

Серветник Євгеній Віталійович

Керівник к.геогр.н., доцент Давидов О.В.

Рецензент к.геогр.н., доцент кафедри

фізичної географії, природокористування і

геоінформаційних технологій Одеського

національного університету імені І.І.

Мечникова, доцент Муркалов О.Б.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	2-4
РОЗДІЛ 1. ПРИРОДНІ ОСОБЛИВОСТІ СУХОЇ КОСИ.....	5-16
1.1. Географічне розташування та загальна характеристика.....	5-10
1.2. Коротка історія дослідження.....	10-12
1.3. Геолого-тектонічні умови.....	12-14
1.4. Гідрометеорологічні умови.....	14-16
РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	17-27
2.1. Польові дослідження, загальна методика та використання отриманих результатів.....	17-19
2.2. Аналіз супутникових знімків.....	17-24
2.3. Індекс NDVI – як індикатор стабільності.....	24-27
РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЕВОЛЮЦІЙНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СУХОЇ КОСИ.....	28-43
3.1. Аналіз матеріалів дистанційних досліджень за період від початку XXI століття.....	28-36
3.2. Еволюційні тенденції розвитку Сухой коси.....	36-43
РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ НА ЕВОЛЮЦІЮ СУХОЇ КОСИ.....	44-51
4.1. Зміни індексу NDVI протягом XXI століття.....	44-47
4.2. Наслідки збільшення кількості рослинних угруповань в межах об'єкта дослідження.....	48-51
ВИСНОВКИ.....	52-54
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	55-58

ВСТУП

Актуальність теми. Актуальність теми роботи зумовлена високою динамічністю та значним природоохоронним значенням Сухої коси. Дана акумулятивна форма є складовою берегової системи Кінбурнська-Покровська-Довгий, яка характеризується вираженими тенденціями до проградації у південно-східному напрямку та постійною трансформацією морфологічних параметрів. .

Висока інтенсивність акумулятивних процесів і стійкі проградацийні тенденції, в перспективі можуть призвести до з'єднання Кінбурнського півострова із островом Довгим. Такий розвиток подій здатен спричинити суттєві зміни геологічних, геоморфологічних та гідрологічних умов у межах району дослідження, , що підкреслює необхідність детального вивчення сучасного стану та динаміки цієї берегової форми.

Додатковим фактором актуальності є повна відсутність можливості проведення систематичних польових досліджень на території коси, що зумовлює необхідність застосування дистанційних методів дослідження. У таких умовах дистанційний моніторинг виступає фактично єдиним інструментом отримання об'єктивної інформації про морфодинамічний стан коси та оцінки напрямків її подальшої еволюції.

Використання супутникових даних (Sentinel, Landsat), а також визначення індексного стану рослинного покриву (NDVI), відкриває можливості для безперервного, просторово репрезентативного та економічно ефективного моніторингу динаміки акумулятивних берегових форм. Це, у свою чергу, створює наукову основу для прогнозування розвитку прибережних систем та прийняття обґрунтованих рішень у сфері природокористування і охорони довкілля.

Мета роботи: полягає у встановленні особливостей морфодинамічного розвитку Сухої Коси та оцінці стану рослинного покриву як індикатора стабілізації берегової форми на основі дистанційного аналізу.

Для досягнення поставленої мети, необхідно вирішити наступні **завдання:**

1. Визначити природні особливості та умови розвитку Сухої коси.
2. Проаналізувати методологічні особливості дослідження берегових форм рельєфу дистанційними методами.
3. Здійснити аналіз супутникових даних району Сухої коси та визначити морфодинамічні тенденції її розвитку.
4. Дослідити динамічність рослинного покриву коси, як індикатору стабілізації відповідної форми.

Об'єкт дослідження: Суха коса, як складова берегової системи Кінбурнська-Покровська-Довгий.

Предмет дослідження: визначення морфодинамічних тенденцій берегів та стану рослинного покриву Сухої коси, за даними дистанційного моніторингу.

При написанні кваліфікаційної роботи нами були використані наступні **методи наукового дослідження:**

Метод літературного аналізу – використовувався при дослідженні природних особливостей Сухої коси.

Метод картографічного аналізу – був використаний для отримання інформації про просторове розташування географічних та геоморфологічних об'єктів в береговій зоні регіону дослідження.

Метод дистанційних досліджень – застосовувався для визначення просторових особливостей коси та визначення її динамічних тенденцій.

Метод статистичного аналізу – впроваджений при проведенні обробки статистичних даних отриманих з EO Browser.

Практичне значення одержаних результатів полягає у визначенні морфодинамічних тенденцій розвитку Сухої коси та встановленні впливу рослинного покриву на процеси стабілізації берегової форми. Отримані результати дозволяють оцінити роль рослинності як одного з ключових факторів формування та трансформації акумулятивних форм, а також можуть бути використані для прогнозування напрямків їх подальшого розвитку (проградації або деградації).

Запропонована методика дистанційного аналізу може бути застосована у подальших дослідженнях молодих берегових утворень, а також при вирішенні прикладних завдань моніторингу та управління прибережними територіями.

Апробація матеріалів проведеного дослідження. Представлена кваліфікаційна робота апробована під час науково-практичних семінарів кафедри географії та екології, а також під час міжнародної науково-практичної конференції «Українська географія у викликах війни». За результатами дослідження була підготовлена до друку наукова стаття на тему: «Еволюційні тенденції Сухої коси у XXI столітті».

Обсяг і структура роботи. Загальний обсяг роботи складає 57 сторінки, в яких 18 рисунків та 7 таблиць. Кваліфікаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, та списку використаних джерел.

У вступі наведена актуальність роботи, сформульована мета та завдання дослідження, визначений об'єкт та предмет дослідження, описані провідні методи дослідження.

У першому розділі проаналізовано природні особливості Сухої коси, зокрема географічне розташування, історію дослідження, геолого-тектонічні та гідрометеорологічні умови.

У другому розділі розглянуто методологічні особливості дослідження: польові методи, аналіз супутникових знімків та використання індексу NDVI як індикатора стабільності берегової форми.

У третьому розділі проведено аналіз матеріалів дистанційного зондування та визначено еволюційні тенденції розвитку Сухої коси за період 2000–2026 рр.

У четвертому розділі досліджено вплив рослинного покриву на еволюцію Сухої коси через динаміку індексу NDVI та наслідки його зростання.

У висновках узагальнено основні результати дослідження та сформульовано практичні рекомендації.

Список використаних джерел складається з 44 джерел.

РОЗДІЛ 1 ПРИРОДНІ ОСОБЛИВОСТІ СУХОЇ КОСИ

1.1 Географічне розташування та загальна характеристика

Обраний об'єкт дослідження знаходиться в межах південної частини Миколаївської області, в південно-східній частині Кінбурнського півострову та має місце в системі Кінбурнська-Покровська-Довгий [24; 25; 35] (рис 1.1).. Об'єкт дослідження представляє собою берегову морфоскульптуру, яка отримала назву Суха коса. Дана морфоскульптура є береговою акумулятивною формою, яка за генетичними ознаками є косою [30; 32; 37]. Коса була сформована під впливом руху вздовжберегових наносів з морської сторони півострову.,

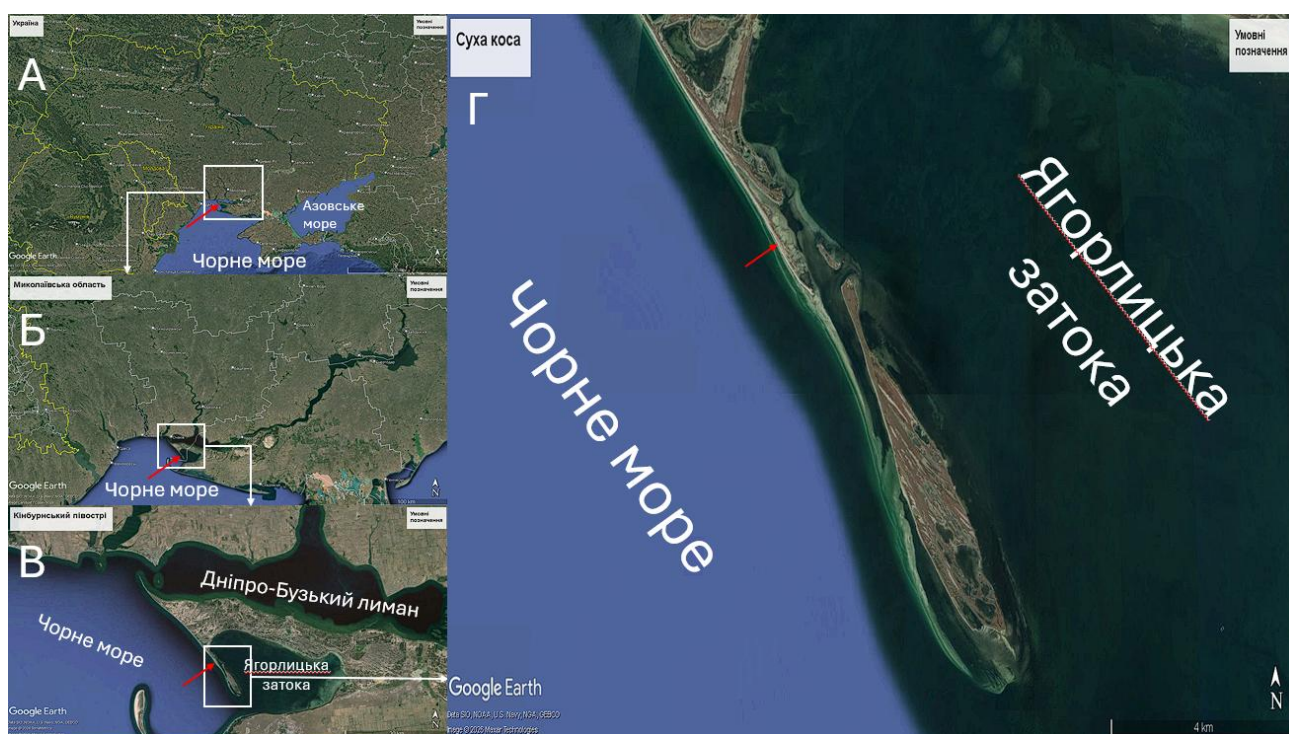


Рис. 1.1 – Географічне положення Сухої коси в межах: А) Країни; Б) Області; В) Півострову; Г) Південно-східної частини системи «Крилатий мис» Кінбурнська-Покровська-Довгий.

Водними об'єктами які мають безпосередній вплив на тіло коси є Чорне море з західної сторони, та Ягорлицька затока зі східної. Географічні об'єкти які знаходяться в межах декількох кілометрів є острови Довгий та Круглий зі сторони затоки, північно-східніше утворилася Покровська коса, а підводний бар Загреба є фактично підводним продовженням тіла Сухої коси..

Морфометричні показники Сухої коси вкрай динамічні, але можливість користування базами даних супутникових знімків та інструментів Google Earth дозволяють їх визначити без прямого контакту з об'єктом. За вимірюванням в межах додатку ми маємо значення станом на 14 березня 2026 року, з яких периметр складає 9,77 км; площа 0,39 км²; довжина 3,79 км; ширина в свою чергу коливається від 30 до 200 м в залежності від місця.

Рослинність займає одну з ключових позицій в даній кваліфікаційній роботі тому варто охопити не тільки територію коси а і півострову в цілому. Флора є неординарною в межах всього півострову і має інтразональний характер, який обумовлений фізичною характеристикою території, тобто домінування низинних територій, літологія та антропогенний вплив. Головний та найбільш розповсюджений вид рослинності в межах півострову це чагарники, також зустрічається велика кількість дерев, які нажалі постраждали в умовах війни. В межах рухомих та прибережних ділянках зустрічаються переважно псамофільна та галофільна рослинності, яка є максимально пристосованою до навколишніх умов, та має швидкоплинний розвиток та укріплення. Серед великої кількості рослин (близько 500 видів) хочемо виділити саме червонокнижних, до яких відноситься: Цетрарія степова (родина Пармелієві — *Parmeliaceae*); Хроодактилон Волле (родина Гоніотріхієві — *Goniotrichaceae*); Холодок Палласа (родина Холодкові — *Asparagaceae*).

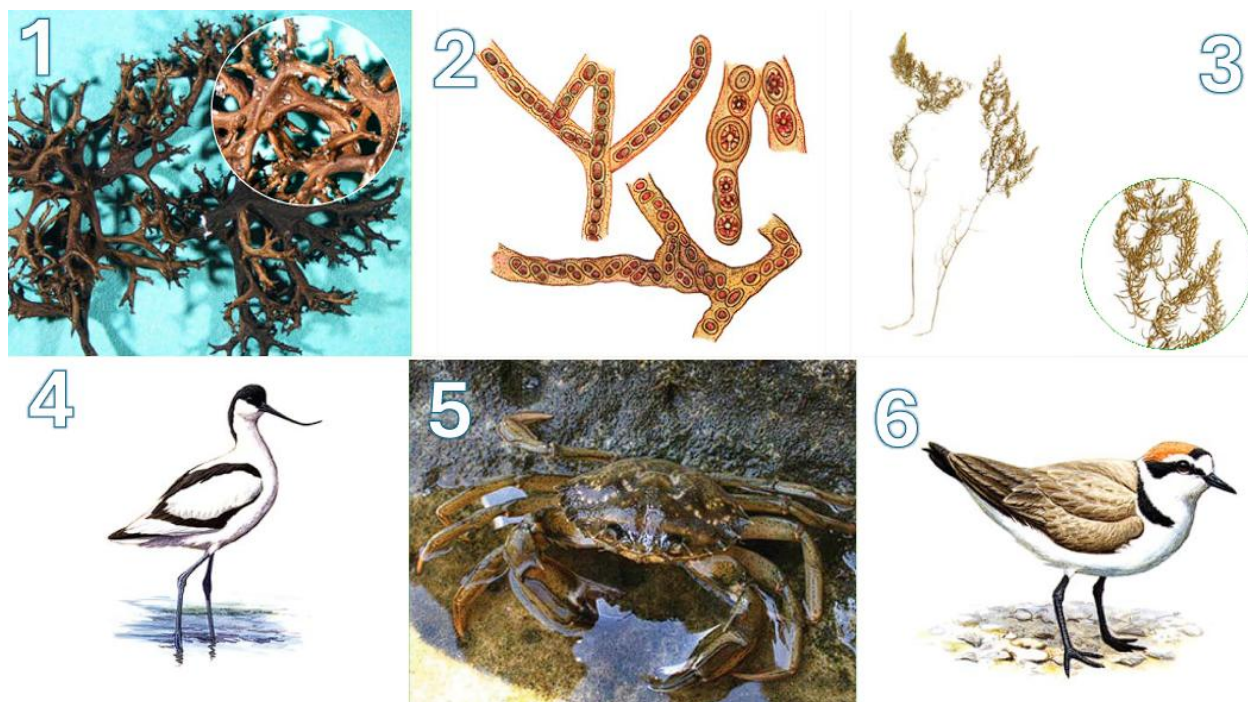


Рис. 1.2 – Червонокнижні представники флори та фауни Кінбурнського півострову та Сухої коси: 1) Цетрарія степова; 2) Хроодактилон Волле; 3) Холодок Палласа; 4) Чоботар; 5) Трав'яний краб; 6) Пісочник морський.

Ґрунти Сухої коси належать до групи інтразональних приморських утворень і є типовими для молодих морських берегових акумулятивних форм рельєфу Кінбурнського півострова. На відміну від материкової частини Кінбурнської арени, де домінують дернові піщані ґрунти з потужним гумусовим горизонтом (до 20 см, вміст гумусу до 1,6 %), на Сухій косі ґрунтоутворення перебуває на початковій стадії (педоліти та ініціальні ґрунти). Домінуючими тут є талассолі (марітимні ґрунти) та марітимні лучні ґрунти (примітивні, малопотужні та середньопотужні), що формуються під безпосереднім впливом моря, періодичних згінно-нагінних процесів та еолової акумуляції.

На кореневій і центральній частинах коси починають формуватися слаборозвинуті дернові піщані ґрунти з першими ознаками гумусоутворення. У дистальній частині, де динаміка найвища, переважають ініціальні піщані ґрунти без чіткого профілю. Завдяки

активному проявленні згінно-нагіннових явищ створюються умови для формування таласосолей. Такі ґрунти низькородючі, схильні до засолення та дефляції, що безпосередньо впливає на швидкість закріплення піщаного масиву рослинністю [21; 18; 17; 39].

Загальна кількість ідентифікованих ландшафтів півострову складає 16 видів, визначених Кривульченком 2016 року. Суха коса є частиною південно-степового підвиду ландшафтів з вільними видовженими акумулятивними формами рельєфу в межах «крилатого мису» Покровського півострова. На відміну від відносно стабільної Покровської коси, Суха коса — новітнє (сформоване за останні 45–50 років), вкрай динамічне утворення, що розвивається за рахунок абразії центральної частини Кінбурнського півострова та перерозподілу вздовжберегових наносів у зоні дивергенції потоків [35; 38; 42; 20].

1.2 Коротка історія дослідження

Оскільки Суха коса є молодою морфоскульптурою (віком близько 50 років) не так багато дослідників встигли дослідити її терени, а враховуючи військовий стан останні 4 роки доступ до об'єкта вкрай обмежений. Робіт присвячених виключно даному утворенню нараховується всього одна і виконана вона за співпраці Шевчук Ю. та Давидова О. В роботах Давидова також зустрічаємо згадки про нашій об'єкт в межах досліджень системи «Крилатий мис» Кінбурнська-Покровська-Довгий. Важливо виокремити книгу Кривульченка А. І. яка повністю присвячена Кінбурнському півострову і має відповідну назву «Кінбурн: ландшафти, сучасний стан та значення».

Розпочнемо з А. І. Кривульченка. У монографії «Кінбурн: ландшафти, сучасний стан та значення» (2016) автор вперше дає детальну

ландшафтну характеристику Сухої коси як новітнього акумулятивного утворення. Він зазначає, що коса сформувалася з потужної обмілини в південно-західній частині Покровського півострова протягом останніх 20–30 років (станом на 2016 рік її довжина становила близько 2,7 км). Кривульченко підкреслює лінійне продовження морського узбережжя, маловиразні берегові вали та початкові еолові дюни, а також порівнює її з давнішою Камбальною (Покровською) косою, виділяючи високу динамічність Сухої коси [35].

Наступний етап досліджень пов'язаний з роботами О. В. Давидова та його колективу. Починаючи з 2019 року в монографії «The “Winged Foreland” Abrasion-Accumulative Systems» та серії статей (2021, 2023, 2024) Суха коса розглядається як структурно-морфологічний елемент фронту Покровського півострова в межах системи «крилатого мису» Кінбурнська–Покровська–Довгий. Автори детально описують її морфологічну будову, острівний бар «Загреба» як підводне продовження коси, гранулометрію наносів та літодинамічні процеси. У 2021 році в статті «Морфологічна будова берегової зони бар'єрної системи “крилатого мису”» Давидов з співавторами вперше чітко виділяє Суху косу як динамічно активну гілку системи [2; 25; 29].

Прикладом сучасних досліджень стала робота Ю. Шевчук та О. Давидова (2025) — «Comprehensive analysis of the evolutionary trends of the Sukha Spit (Kinburn Peninsula, Black Sea, Ukraine)». Це перше і єдине на сьогодні монографічне дослідження, повністю присвячене Сухій косі. Автори провели ретроспективний аналіз за супутниковими даними (Landsat та Sentinel) з 1975 по 2025 рік, доповнений власними польовими спостереженнями 2019–2021 років. Робота встановлює епізодичний характер росту коси (з 1,07 км у 1985 р. до 4,10 км у 2025 р.), роль

хвильових процесів, вплив рослинності (через NDVI) та перспективи подальшої динаміки [15].

Окрім цих ключових праць, контекст формування Сухої коси розкривається в класичних роботах, які описували Кінбурнський півострів до її появи або на початкових стадіях:

- П. Д. Підгородецький (1965) — морфологія та динаміка берегів Кінбурнського півострова;
- Ю. Д. Шуйський (1999) — розподіл наносів уздовж морського краю півострова;
- В. П. Зенкович (1960) — загальна морфологія північно-західної частини Чорного моря.

Таким чином, історія вивчення Сухої коси налічує лише близько 10 років активних спеціалізованих досліджень. До 2016 року коса згадувалася переважно як новоутворена форма в загальних ландшафтних оглядах, а після 2022 року всі дослідження перейшли в дистанційний формат. Саме це робить актуальним використання супутникових даних і індексу NDVI [15; 35].

1.3 Геолого-тектонічні умови

Суха коса, як новітня акумулятивна форма рельєфу, сформувалася в межах загальної геолого-тектонічної структури Кінбурнського півострова, який розташований у центральній частині Південноукраїнської монокліналі (Причорноморської тектонічної западини) — складової частини Східноєвропейської платформи. Кристалічний фундамент (гнейси, кристалічні сланці, амфіболіти дорифейського віку) залягає на глибині 1,7–1,8 км. Осадовий чохол представлений переважно морськими

карбонатними породами (вапняками, зрідка пісковиками та глинами верхньосарматського та меотичного віку), які перекриті потужною товщею (24–44 м) алювіальних піщаних відкладів Пра-Дніпра та, ймовірно, Пра-Південного Бугу [31].

У тектонічній будові регіону важливу роль відіграє субмеридіональний Миколаївський тектонічний розлом, що проходить за 15–25 км на захід від півострова й контролює західну межу суходолу. У межах півострова фіксуються менш масштабні розломи (зокрема в районі Очаківського мису та с. Василівка), а також широтний прогин Одеського тектонічного блоку, проявом якого є акваторії Дніпровсько-Бузького лиману та Ягорлицької затоки. Саме ці структурні елементи визначають загальну низинність території та сприяють накопиченню молодих четвертинних відкладів.

Неотектоніка та сучасна геодинаміка характеризуються поступовим зануренням морського узбережжя зі швидкістю 0,9–1,5 мм/рік (максимальні значення — в районі Кінбурнської коси та її продовження). На тлі загального опускання відбувається локальне здіймання острова Березань (3–4 мм/рік).

Геологічна будова Сухої коси безпосередньо пов'язана з молодими голоценовими морськими та алювіально-морськими відкладами. Коса сформована на потужній обміні в південно-західній частині Покровського півострова за рахунок перерозподілу вздовжберегових наносів у зоні дивергенції потоків. Підводне продовження коси (острівний бар «Загреба») та сама коса складені середньо- та дрібнозернистими пісками з домішками черепашок і детриту. Потужність четвертинних відкладів тут значно менша, ніж на материковій частині арени, що обумовлює високу динамічність форми та її чутливість до літодинамічних процесів.

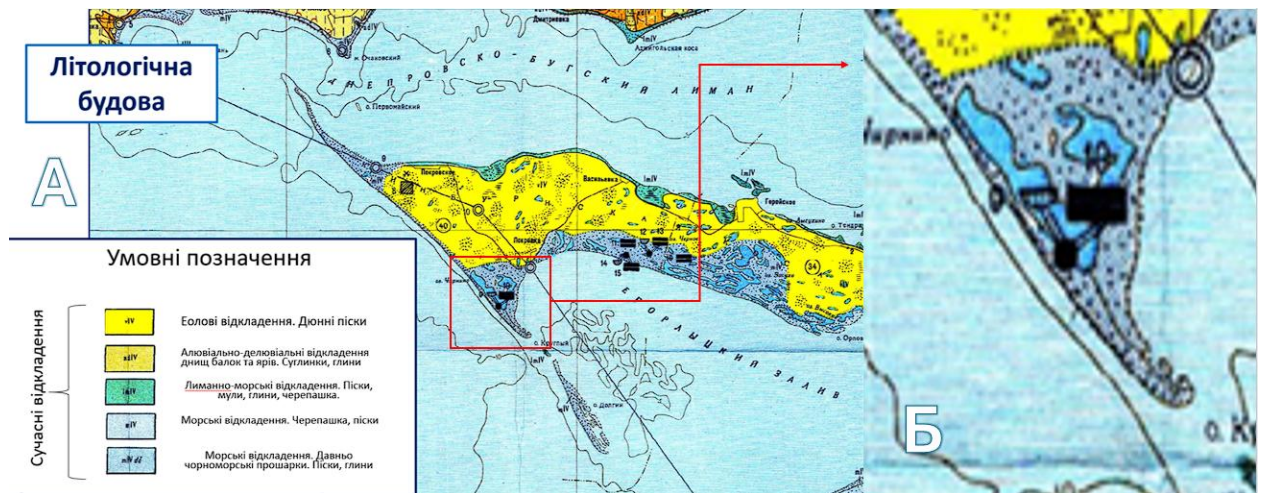


Рис. 1.3 Літологічна будова: А) Повна карта з умовними позначеннями; Б) Фрагмент карти на якому зображена Суха коса

Таким чином, геолого-тектонічні умови Кінбурнського півострова (загальне опускання платформи та наявність розломів) створюють сприятливе середовище для сучасної акумуляції наносів, завдяки чому Суха коса продовжує активно розвиватися як частина бар'єрної системи «крилатого мису» Кінбурнська–Покровська–Довгий. Ці умови безпосередньо впливають на морфодинаміку коси, що підтверджується даними дистанційного аналізу [39; 30; 41].

1.4 Гідрометеорологічні умови

Гідрометеорологічні умови Сухої коси формуються під впливом помірно-континентального клімату Кінбурнського півострова та безпосереднього сусідства двох контрастних водних об'єктів — відкритого Чорного моря (західний бік коси) та мілководної Ягорлицької затоки (східний бік). Коса лежить у зоні активних згінно-нагінних процесів без значних припливно-відпливних коливань, що визначає її високу морфодинамічну чутливість[34].

Кліматичні характеристики

Півострів має помірно-континентальний клімат з яскраво вираженим морським впливом. Основні фактори формування:

- радіаційний (сумарна сонячна радіація становить 470 МДж/м² на рік, гідротермічний коефіцієнт 0,5–0,7);
- циркуляційний (середньорічна швидкість вітру 4–8 м/с, з максимумами 6–10 м/с у холодний період; вітроенергетичні ресурси перевищують 1600 годин робочої швидкості вітру на рік);
- характер підстильної поверхні (піщані масиви, дюни та численні озера-западини).

Середньорічна кількість атмосферних опадів становить близько 400 мм, що робить регіон одним із найсухіших на північному заході Чорного моря. Зима м'яка і коротка, літо спекотне й тривале (вегетаційний період до 240 днів), весна та осінь теплі й відносно сухі. Такі умови сприяють інтенсивним еоловим процесам і швидкому висиханню поверхневих відкладів коси.

Гідрологічні особливості

Рівень водної поверхні у районі Сухої коси повністю залежить від змінно-нагінних явищ, спричинених вітрами. Чорне море (західний бік коси): солоність води в середньому багаторічному розрізі становить 13–17 ‰; температура поверхневих вод у травні–серпні коливається в межах 15–22 °С; взимку море переважно не замерзає.

- Ягорлицька затока (східний бік коси): мілководна водойма з глибинами 2–4 м (максимальна — 5 м). Її гідрологічний режим повністю залежить від Чорного моря: солоність коливається в межах 10–18 ‰ (іноді перевищує 20 ‰), температура води влітку сягає 22–23 °С.

Ці контрастні гідрологічні умови створюють зону дивергенції вздовжберегових потоків наносів, що є головним чинником формування та

зростання Сухої коси. Згінно-нагінні явища призводять до періодичного затоплення низьких ділянок коси та перерозподілу піщаного матеріалу, що посилює її динаміку.

Таким чином, гідрометеорологічні умови регіону характеризуються високою вітровою активністю, недостатнім зволоженням і згінно-нагінним режимом, що безпосередньо впливає на морфодинамічні тенденції розвитку Сухої коси та робить дистанційний аналіз (NDVI, супутникові знімки) особливо актуальним для моніторингу [20; 30; 37].

РОЗДІЛ 2. МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1 Польові дослідження, загальна методика та використання отриманих результатів

Польові дослідження є обов'язковою основою для надійної інтерпретації даних дистанційного зондування Землі, оскільки вони забезпечують безпосередні натурні вимірювання, які дозволяють калібрувати супутникові знімки, перевіряти точність визначення берегової лінії та верифікувати значення індексу NDVI, на превеликий жаль в умовах війни неможливо проводити такий вид робіт. Загальна методика польових робіт на акумулятивних берегових формах включає кілька послідовних етапів і передбачає використання стандартного геоморфологічного обладнання [19; 36].

Під час експедиції виконуються такі види робіт:

- закладення постійних реперів (стаціонарних точок спостереження) на ключових ділянках берегової смуги;
- геоморфологічне профілювання — прокладання поперечних профілів перпендикулярно до урізу води з охопленням надводної та субаквальної зон;
- відбір проб прибережних наносів для подальшого лабораторного аналізу;
- фотодокументація ключових ділянок і візуальний опис рельєфу, рослинності та процесів;
- GPS-трекінг берегової лінії з фіксацією точок зміни напрямку та характерних форм.

Основні прилади та обладнання, що застосовуються:

- GPS-приймач (або навігатор) для точної прив'язки реперів і трекінгу з точністю до 3–5 м;
- набір геологічних сит і електронні лабораторні ваги для гранулометричного аналізу проб;
- оптичний або цифровий нивелір (теодоліт) для вимірювання висотних відміток уздовж профілю;
- цифровий фотоапарат для фіксації морфологічних особливостей.



Рис. 2.1 – Прилади та обладнання які використовують під час польових робіт: 1) GPS-приймач; 2) набір геологічних сит; 3) електронні лабораторні ваги; 4) оптичний нівелір, штатив та рейка; 5) теодоліт; 6) фотоапарат.

Після завершення польових робіт проби наносів обробляються в лабораторії: проводиться ситовий аналіз для визначення фракційного складу, результати заносяться до електронних таблиць Microsoft Excel, де

виконуються статистичні розрахунки та будуються гіпсометричні профілі. GPS-координати імпортуються в Google Earth Pro для створення цифрової моделі рельєфу, прив'язки профілів до супутникових знімків і подальшого порівняння з архівними даними [19; 36].

Отримані результати використовуються для кореляції з дистанційними даними: вони дозволяють уточнити положення берегової лінії на знімках Sentinel-2 і Landsat, перевірити реальність змін, зафіксованих за допомогою NDVI, та кількісно оцінити швидкість акумуляції або ерозії на конкретних ділянках. Таким чином, польові матеріали слугують еталоном достовірності для всього дистанційного аналізу.

2.2 Аналіз супутникових знімків

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є одним із найефективніших сучасних методів вивчення динаміки берегових форм рельєфу. Воно дозволяє отримувати об'єктивну, повторювану та високодетальну інформацію про територію без прямого фізичного контакту з об'єктом. Супутникові знімки формуються пасивними оптичними сенсорами, які реєструють відбиття сонячного випромінювання від земної поверхні в різних ділянках електромагнітного спектра. Кожен спектральний канал відповідає певному діапазону довжин хвиль і несе специфічну інформацію:

- видимі канали фіксують колір і яскравість, ближній інфрачервоний (NIR) — стан рослинності та вологість, короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) — вміст води та мінеральний склад ґрунтів.
- Найпоширеніші спектральні діапазони, які використовуються для моніторингу прибережних зон:

- Прибережний/аерозольний (Coastal Aerosol) — для оцінки мілководдя та атмосферних аерозолів;
- Видимі канали (Blue, Green, Red) — для візуалізації та виявлення змін берегової лінії;
- Близький інфрачервоний (NIR) — ідеальний для розрахунку індексу NDVI та моніторингу рослинного покриву;
- Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR) — для виявлення вологи та мінерального складу наносів;
- Панхроматичний канал — забезпечує максимальну просторову роздільність (до 10–15 м).

Сучасні супутникові місії Sentinel-2 (ESA, Copernicus) та Landsat-8/9 (NASA/USGS) дають оптимальне поєднання просторової роздільності (10–30 м), багатоспектральності та періодичності (5–16 днів). Завдяки цим даним можливо не лише фіксувати зміни берегової лінії, але й кількісно оцінювати акумуляцію/ерозію, динаміку рослинності та вплив гідрометеорологічних факторів [5; 11; 14].

Інноваційний метод дослідження, став одним з найпопулярніших та найзручніших в географічній сфері. Наразі майже будь які дослідження морфодинаміки не можуть обійтися без даного виду роботи, оскільки він має низку плюсів:

- можливість переглядати та користуватися даними по будь якій точці планети будучи за тисячі кілометрів;
- вільний доступ до знімків, на більшості платформ, у високій якості;
- додатки для аналізу та знімання даних знаходяться у вільному доступі;

- можливість користуватися знімками зробленими десятки років тому і відповідно їх аналізувати;

- зручне користування доступне для освоєння в короткі строки.

Звичайно як і будь який метод даний теж має свої негативні особливості:

- незважаючи на високу якість сучасних знімків, більшість тих, які були зроблені до ХХІ століття мають дуже низьку якість, яка критично збільшує похибку під час проведення дослідження;

- незважаючи на низький поріг входження, для досягнення майстерності та проведення дійсно висококваліфікованих досліджень за допомогою ПС технологій потрібно велика кількість практики та часу;

- навіть сучасні знімки можуть містити мінімальну похибку в декілька метрів (від 3 до 5 м).

Особливу увагу хочемо приділити ключовим інструментам, які використовувались під час проведення дослідження і є невід'ємним джерелом матеріалу для цієї роботи. Першим на черзі є Google Earth, який на протязі всього дослідження надавав зручні інструменти для вимірювання фізичних параметрів тіла коси, огляду об'єкта дослідження в часі, формуванню карт з результатами. Головні інструмент, які були використанні в межах даного дослідження – це багатокутник, лінійка та накладання зображення. Після перегляду рисунків представлених вашій увазі нижче, ви будете мати повне уявлення про функціональні можливості додатка.

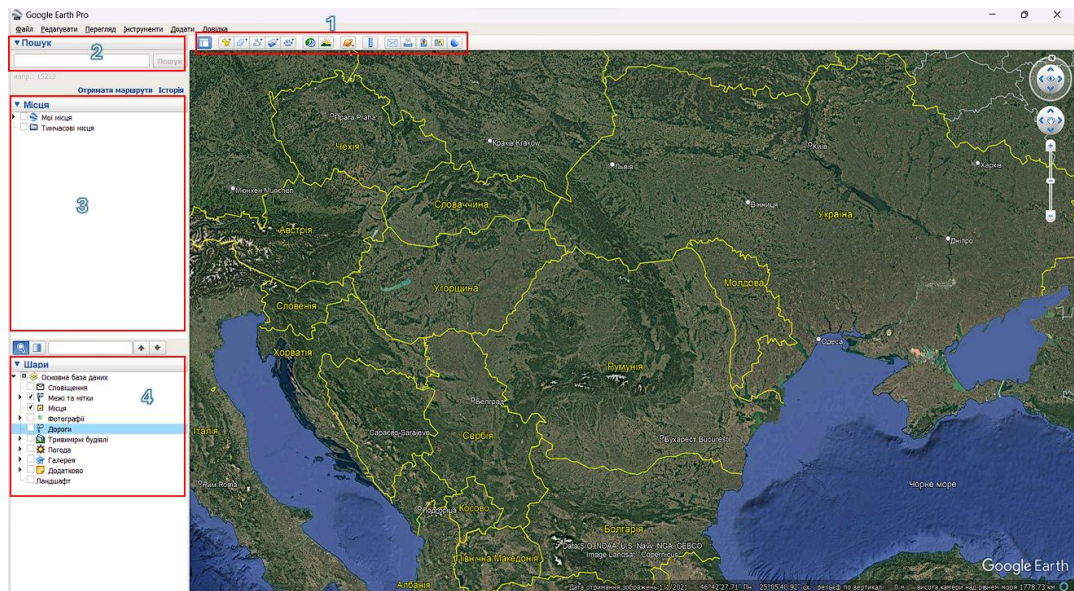


Рис. 2.2 – Внутрішнє середовище Google Earth: 1) панель інструментів; 2) пошук; 3) місця; 4) шари.



Рис. 2.3 – Панель інструментів Google Earth: 1) приховати/показати бокову панель; 2) додати мітку; 3) додати багатокутник; 4) додати шлях; 5) додати накладання зображення; 6) запис подорожі; 7) показати зображення в часі; 8) показати, як сонячне світло падає на ландшафт; 9) переключити режим перегляду; 10) лінійка; 11) електронна пошта; 12) друк; 13) зберегти зображення; 14) переглянути в картах Google; 15) переглянути через Google Планета Земля в Інтернеті.

Другим ключовим інструментом в роботі з географічними об'єктами є EO Browser, який припинив свою роботу 20.03.2026 і перейшов у вдосконалену версію Planet Insights. Даний додаток має об'ємну базу з супутниковими та аерофотознімками, що дозволяє досліджувати Суху косу на протязі всього XXI століття, в його можливості входить:

- завантаження джерел даних з Sentinel та Landsat та ін.;
- порівнювати знімки між собою у зручній вкладці;
- візуалізувати будь який знімок в межах території дослідження;
- розглянути територію використавши кастомні налаштування спектру;
- виділити конкретну територію та отримати дані;
- завантажити статистичні дані;
- можливість сортування даних за хмарністю;
- створювати колаж для перегляду змін морфодинаміки об'єкта в часі.

Загальні враження виключно позитивні, оскільки такої доступності до даних майже не зустрічається, ресурс є зручним у використанні та дозволяє отримувати інформацію у декількох форматах, від KMZ до звичайних рисунків.

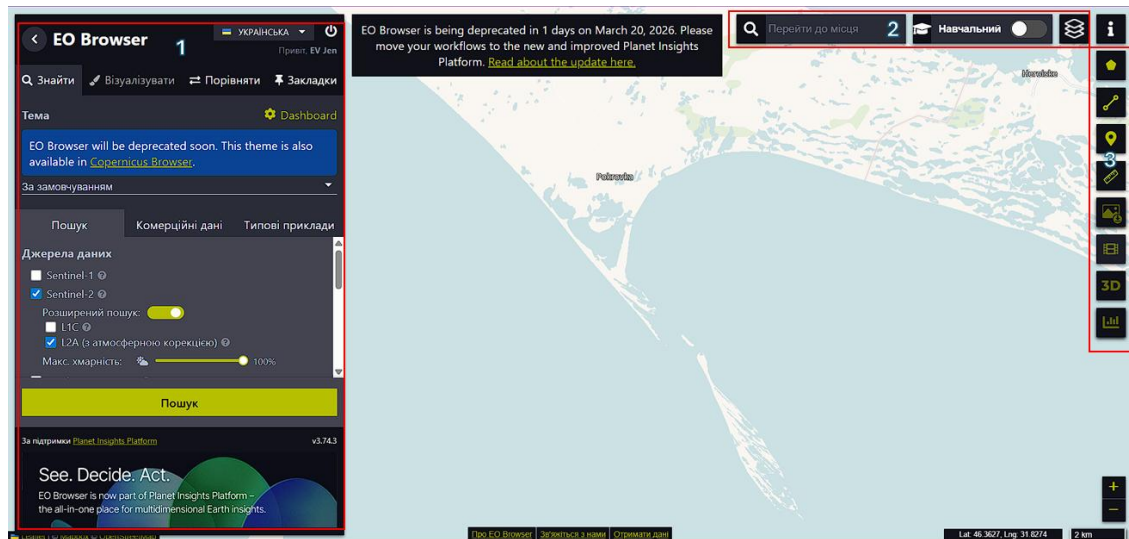


Рис. 2.4 – Робочий простір в EO Browser: 1) бокова панель; 2) пошук, шари та можливість перейти в навчальний режим; 3) панель інструментів.

У висновку про метод аналізу супутникових знімків можемо підкреслити доступність ресурсів для дослідження природних і

антропогенних об'єктів та високу якість тандему Google Earth та EO Browser, яка дозволяє працювати в обох додатках одночасно, та візуалізувати етапи дослідження в різних періодах для зручного сприйняття будь якою людиною. Особливо актуальним метод дослідження є для України, оскільки провести будь який вид польових робіт є неможливим через війну, та навіть після припинення, вірогідний підвищений ризик небезпеки через мінування та наслідки бойових дій [5; 11; 14].

2.3 Індекс NDVI – як індикатор стабільності

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI — Normalized Difference Vegetation Index) є одним із найпоширеніших і найнадійніших інструментів дистанційного зондування для оцінки стану рослинного покриву та його впливу на морфодинаміку берегових форм. Він базується на двох ключових спектральних каналах супутникових знімків Sentinel-2: ближньому інфрачервоному (NIR, канал B8) та червоному (Red, канал B4). Формула розрахунку має вигляд:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$$

Значення індексу коливаються від -1 до $+1$. У EO Browser (та його наступнику Planet Insights) автоматично застосовується стандартна кольорова шкала, яка дозволяє візуально інтерпретувати результати:

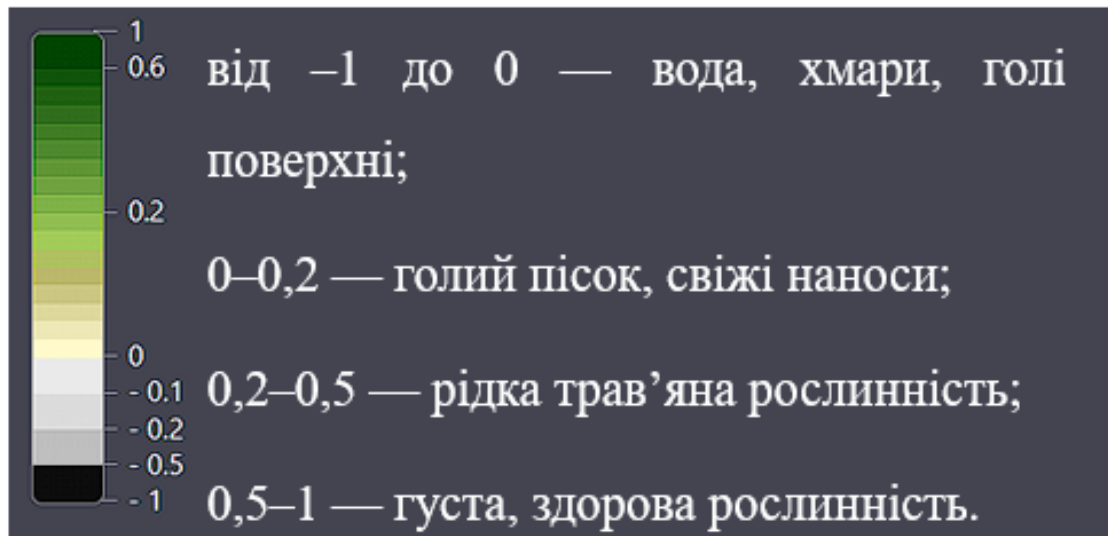


Рис. 2.5 – Кольорова шкала індексу

Для Сухої коси NDVI є безпосереднім індикатором стабільності берегової форми. Високі значення індексу свідчать про розвиток псамофільної та галофільної рослинності, коренева система якої фіксує піщаний масив, зменшує еолову дефляцію та захищає косу від хвильового розмивання. Низькі значення вказують на ділянки активної ерозії або свіжої акумуляції, де рослинність ще не встигла закріпитися. Таким чином, динаміка NDVI дозволяє не лише фіксувати поточний стан, але й прогнозувати подальший розвиток коси в умовах зміни клімату та гідрометеорологічних факторів [11; 12; 16].

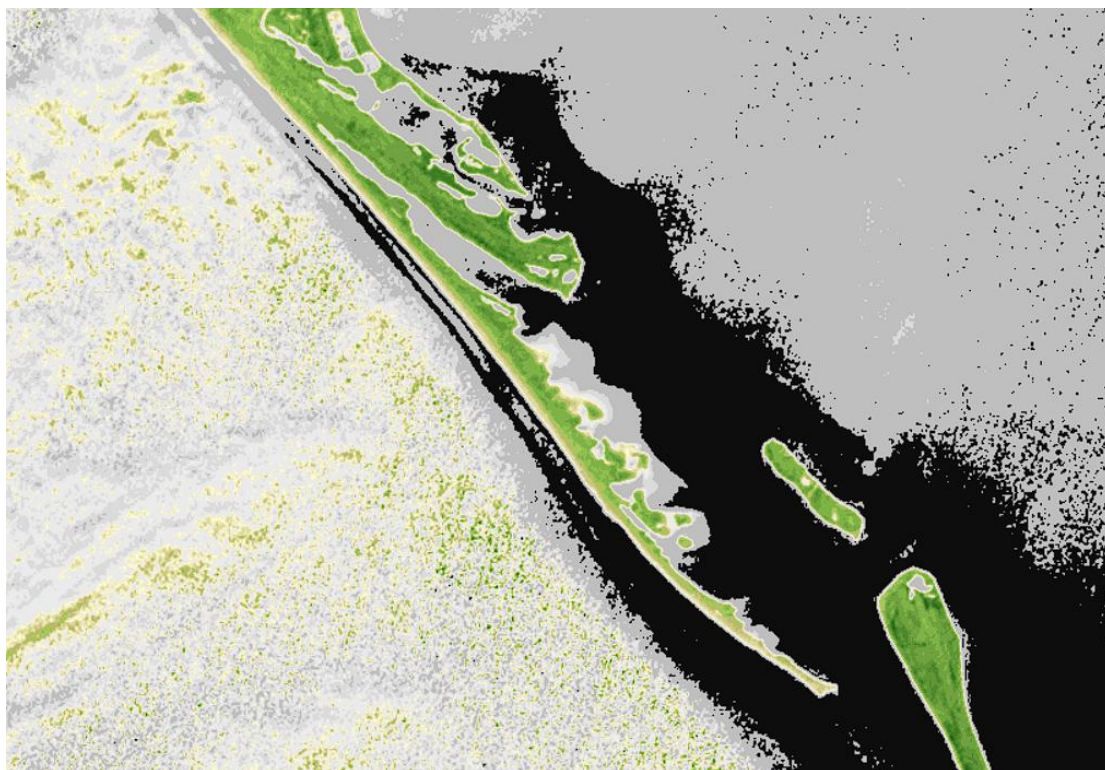


Рис. 2.6 – Приклад візуалізації NDVI на ділянці Сухої коси в EO Browser.

У EO Browser/Planet Insights індекс NDVI розраховується миттєво після вибору відповідної візуалізації. Крім того, платформа дає можливість переглядати графік зміни значень у часі за будь-який період (див. рисунок нижче) та завантажувати статистичні дані у форматі CSV для подальшого аналізу в Microsoft Excel.

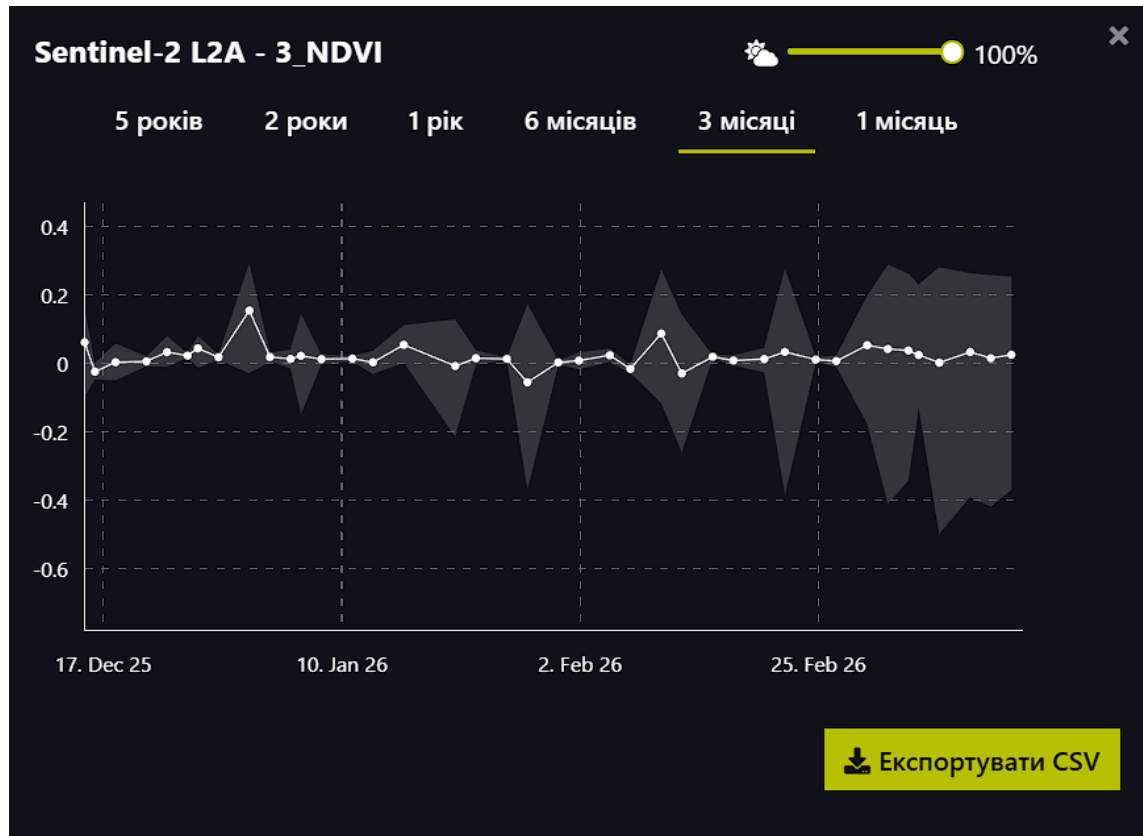


Рис. 2.7 – Графік динаміки індексу NDVI (Sentinel-2 L2A) за період грудень 2025 – лютий 2026 року в EO Browser.

Завдяки простоті розрахунку, наочній візуалізації та можливості експорту даних NDVI став основним інструментом для оцінки ролі рослинного покриву в стабілізації Сухої коси [11; 17; 18].

РОЗДІЛ 3. ВИЗНАЧЕННЯ ЗАГАЛЬНИХ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ СУХОЇ КОСИ

3.1 Аналіз матеріалів дистанційних досліджень за період від початку XXI століття

Для проведення даного етапу дослідження нами була використана база даних EO Browser з космічними знімками з 2 лютого 2000 по 16 березня 2026 року. Космічні місії, тобто супутники, які забезпечили обширну базу є: Copernicus:Sentinel-2 та USGS:Landsat моделі від 4 до 9. В даний період були вилучені знімки з кожного сезону (зима, весна, літо, осінь) у візуалізації True color та NDVI, у форматі KMZ/PNG, для детального розгляду та вимірювання ключових параметрів таких як площа та протяжність тіла Сухої коси по фронтальній береговій лінії(зі сторони Чорного моря) за допомогою Google Earth. Дані 2 параметри були обрані ключовими, оскільки демонструють динамічність змін, які відбувалися з об'єктом дослідження кожні декілька місяців. Для зручності розуміння даних отриманих під час дослідження ми розділили результати на шість окремих таблиць, розділених за параметром та періодами двічі по 10 років та один раз 7 років. Варто відразу зазначити, що в певні сезони (особливо зимові) ранніх періодів зйомки локації, знімки в якості, яка дозволяє виміряти площу та протяжність, були відсутні через: низьку періодичність фотографування або хмарність.

Таблиця 3.1. Площа км² з 2000 по 2009

Рік	Період року
-----	-------------

	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2000	0,20	0,19	0,23	0,21
2001	-	0,27	0,21	0,18
2002	0,23	0,23	0,24	0,29
2003	-	0,28	0,26	0,24
2004	-	0,22	0,19	0,23
2005	0,22	0,19	0,22	0,24
2006	-	0,23	0,25	0,25
2007	-	0,28	0,22	0,27
2008	-	0,19	0,26	0,29
2009	0,28	0,26	0,27	0,29

Таблиця 3.2. Протяжність виміряна по фронтальній береговій лінії від кореневої частини в км з 2000 по 2009

Рік	Період року			
	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2000	1,74	1,71	3,45	3,20
2001	-	3,13	1,94	1,95
2002	2,10	2,10	2,29	3,73
2003	-	2,35	2,38	2,41
2004	-	2,58	2,50	2,49
2005	2,50	2,58	2,39	2,46
2006	-	2,10	2,24	2,22
2007	-	2,51	2,51	2,33
2008	-	2,31	2,40	2,80
2009	2,35	2,43	2,54	2,58

Після проведення вимірювань як площі так і протяжності ми можемо підмітити головні зміни в плані еволюції берегової форми протягом 2000-х, і розпочнемо з площі:

- на початку 2000-х вона становила 0,20 км², в кінці десятиліття значення зросло до 0,29 км², тобто на 0,09 км² за увесь період;
- мінімальне значення площі становило 0,18 км² восени 2001 року;
- максимальне значення площі становило 0,29 км² тричі за період, всі три восени 2002, 2008 та 2009 року;
- найбільша короткострокова зміна, зі збільшенням тіла на 0,07 км² відбулася 2008 року в період весна\літо;
- важливо також виділити значний вплив формування майбутніх часток Сухої коси, які суттєво вплинули на зміну параметру, як наприклад літо/осінь 2000 року.

Протяжність:

- на початку 2000-х вона становила 1,74 км, в кінці десятиліття значення зросло до 2,58 км, тобто на 0,84 км за увесь період;
- мінімальне значення протяжності становило 1,71 км весною 2000 року;
- максимальне значення протяжності становило 3,71 км восени 2002 року (з урахуванням прорви між частинами коси, які не змогли сформувати кінцеве тіло);
- найбільша короткострокова зміна, зі збільшенням тіла на 1,64 км відбулася 2000 року в період весна\літо;

- значний вплив на зміни протяжності був спровокований формуванням ще не з'єднаної ділянки з основним тілом коси, але включеною в вимірювання (для зручності шляхи поділені на 3, тобто основне тіло, прорва(ділянка без суші) та новоутворена ділянка).

Загальні тенденції показують постійний ріст і збільшення обох параметрів з часом на протязі 2000-х, вони є особливо динамічними в даний період дослідження.

Таблиця 3.3. Площа км² з 2010 по 2019

Рік	Період року			
	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2010	-	0,29	0,23	0,28
2011	0,28	0,26	0,27	0,30
2012	-	-	-	-
2013	0,29	0,31	0,32	0,35
2014	0,31	0,30	0,27	0,28
2015	-	0,30	0,30	0,35
2016	0,42	0,36	0,29	0,35
2017	-	0,31	0,33	0,33
2018	0,33	0,30	0,32	0,33
2019	0,32	0,32	0,32	0,34

Таблиця 3.4. Протяжність виміряна по фронтальній береговій лінії від кореневої частини в км з 2010 по 2019

Рік	Період року			
	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2010	-	2,67	2,66	2,73
2011	2,80	2,77	2,78	2,81

2012	-	-	-	-
2013	2,69	2,74	2,84	2,84
2014	2,40	2,37	2,50	2,53
2015	-	2,58	3,10	3,11
2016	4,07	3,10	3,20	3,19
2017	-	4,02	3,79	3,80
2018	3,77	3,23	3,78	3,81
2019	3,31	3,32	3,28	3,44

Друге десятиліття також демонструє неабияку динамічність, яка підтверджується постійними коливаннями на протязі 2010-х, як площі так і протяжності. Першим параметром для розгляду є площа:

- на початку 2010-х вона становила 0,29 км², в кінці десятиліття значення зросло до 0,34 км², тобто на 0,05 км² за увесь період;
- мінімальне значення площі становило 0,23 км² влітку 2010 року;
- максимальне значення площі становило 0,42 км² взимку 2016 року;
- найбільша короткострокова зміна, зі зменшенням тіла на 0,07 км² відбулася 2016 року в період весна\літо та збільшенням на 0,07 км² з осені 2015 по зиму 2016;
- у даний період теж були випадки формування окремого продовження, або прорв в межах близьких до дисталі, також важливо зазначити відсутність даних 2012, через проблеми з супутником Landsat 7.

Другий, це відповідно протяжність:

- на початку 2010-х вона становила 2,67 км, в кінці десятиліття значення зросло до 3,44 км, тобто на 0,77 км за увесь період;
- мінімальне значення протяжності становило 2,37 км весною 2014 року;
- максимальне значення протяжності становило 4,07 км взимку 2016 року (з урахуванням прорви між частинами коси, які не змогли сформувати кінцеве тіло);
- найбільша короткострокова зміна, зі збільшенням тіла на 0,97 км відбулася 2016 року в період зима\весна;
- ситуація з утворенням продовження окремо від основного тіла коси зберігається, розрахунки велись відповідно попереднім.

Вже в порівнянні з 2000-ними довгострокові зміни за весь період зазнали суттєвих змін, а саме збільшення площі відбулося з значно меншими масштабами в розрізі площі, та невеликі в плані параметра протяжність, але загальна тенденція з проградацією зберігається.

Таблиця 3.5. Площа км² з 2020 по 2026

Рік	Період року			
	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2020	0,34	0,33	0,33	-
2021	0,34	0,34	0,32	0,34
2022	0,38	0,36	0,34	0,37
2023	0,36	0,34	0,34	0,34
2024	0,39	0,35	0,36	0,34
2025	0,39	0,39	0,37	0,39
2026	0,37	0,37	-	-

Таблиця 3.6. Протяжність виміряна по фронтальній береговій лінії від кореневої частини в км з 2020 по 2026

Рік	Період року			
	Зимовий	Весняний	Літній	Осінній
2020	3,44	3,32	3,49	-
2021	3,56	3,57	3,60	3,62
2022	3,63	3,68	3,68	3,67
2023	3,70	3,72	3,72	3,77
2024	3,81	3,84	5,1	3,84
2025	5,14	5,09	5,11	5,13
2026	3,87	3,86	-	-

Найкоротший з проміжків дослідження припав на третє десятиліття ХХІ століття, він склав 6 років та 3 місяці. Данні отриманні в цей проміжок є найбільш якісними, оскільки найкраща якість зображень, дозволяє вимірювати з найменшими похибками.

Площа:

- на початку 2020-х вона становила 0,34 км², на весні 2026 року значення зросло до 0,38 км², тобто на 0,04 км² за увесь період;
- мінімальне значення площі становило 0,32 км² влітку 2021 року;
- максимальне значення площі становило 0,39 км² і спостерігається по декілька разів, найбільше протягом 2025 року;
- найбільші короткострокові зміни, зі збільшенням на 0,05 км² зустрічалися в періоди осені\зими 2023-2024 та 2024-2025;

- у даний період брались до уваги основне тіло коси та ділянки достатньо великі і довгострокові, тому різких збільшень або зменшень не було визначено.

Протяжність:

- на початку 2020-х вона становила 3,44 км, в на весні 2026 року значення зросло до 3,86 км, тобто на 0,42 км за увесь період;
- мінімальне значення протяжності становило 3,32 км весною 2020 року;
- максимальне значення протяжності становило 5,14 км взимку 2025 року (з урахуванням прорви між частинами коси, які не змогли сформувати кінцеве тіло);
- найбільша короткострокова зміна, зі збільшенням тіла на 1,30 км відбулася в період осінь 2024\зима 2025;
- ситуація з утворенням продовження окремо від основного тіла коси зберігається, розрахунки велись відповідно попереднім.

Загалом період характеризується відносною стабільністю з невеликими змінами, але на фоні більшості інших берегових форм лишається динамічним і часто змінюваним особливо це помітно при погляді на протяжність.

Загалом в період з зими 2000 по весну 2026 року параметр площі зріс на 0,18 км², з 0,20 км² по 0,38 км², в свою чергу протяжність на 2,12 км, з 1,74 км по 3,86 км. З точки зору звичайного спостерігача це може здаватися невеликими змінами враховуючи кількість часу, але збільшення параметрів майже у два рази площі та більш ніж у 2 рази протяжності свідчить про надзвичайну динамічність Сухої коси та проградацію відповідного утворення.

3.2. Еволюційні тенденції розвитку Сухої коси

Суха коса вкрай динамічне новоутворення, про що свідчать всі дослідження показані в попередніх розділах та підрозділах, але велика кількість чисел без візуалізації, на нашу думку, майже немає наукової цінності. В даному підрозділі будуть представлені побудовані карти на основі проведених досліджень для наочності. Карти будуть побудовані за допомогою Google Earth та описані кожен знімок відповідно. Чіткість зображень початку XXI століття дуже низька, тому будуть показані переважно площі побудовані на основі морфометричних показників тіла коси.

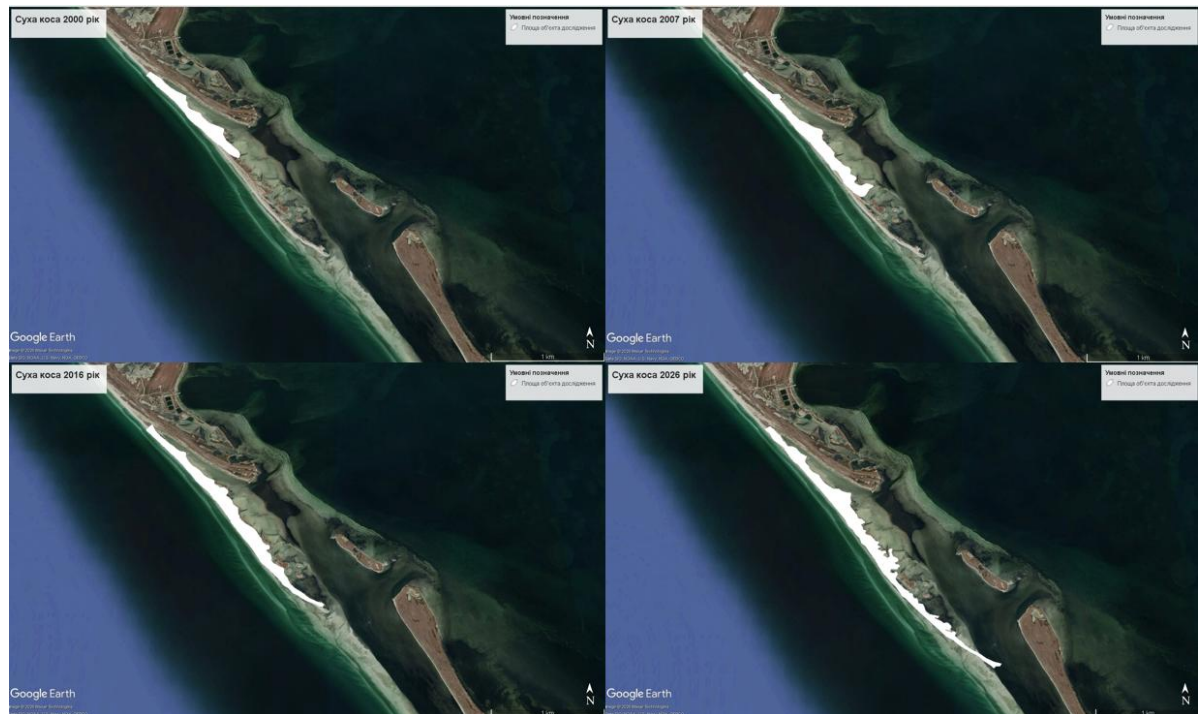


Рис. 3.1 – Зміни площі та форми Сухої коси (2000–2026).

На зображенні наведено суперпозицію контуру коси в різні роки, білий колір показує накопичену площу за 26 років. Ліворуч зверху – початкове положення коси у 2000 р., праворуч знизу – її вигляд у 2026 р. Чітко простежується помітне видовження Сухої в південно-східному напрямку, та значне нарощування площі. Це узгоджується з відомим даними про

збільшення протяжності коси, а рукав із наявного підводного бару був перетворений на суходільну акреційну форму. Спостережувані зміни укладаються у «епізодичний» сценарій розвитку: коса не зростає рівномірно, а час від часу робить різкі «стрибки» довжини й площі. Так, за даними таблиць розділу 3.1, площа збільшилася майже вдвічі, а довжина – більш ніж в два рази, підтверджуючи пульсуючий характер проградації коси [10; 15; 25].

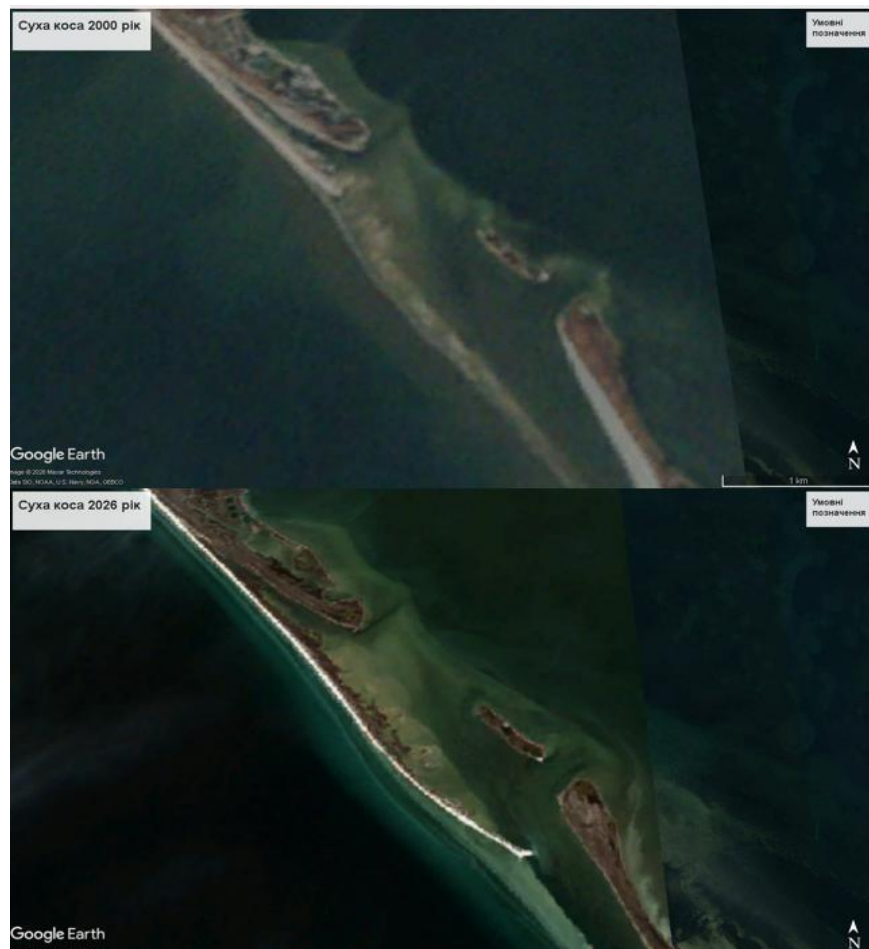


Рис. 3.2 – Супутникові знімки Сухої коси для порівняння форм (ізолюваний приклад).

На цьому фото видно, як контур коси відрізняється у двох знімках різних років. Різниця розмірів коси помітна навіть неозброєним оком, що ілюструє високу динамічність берегового утворення. Такі швидкі зміни не є унікальними тільки для Сухої коси – молоді берегові коси звичайно

зростають епізодично і мають пульсуючий ріст. На зображенні також видно ділянки свіжих відкладень піску на кінчику коси – типовий ознака прагнення аккреційної форми вийти вперед.

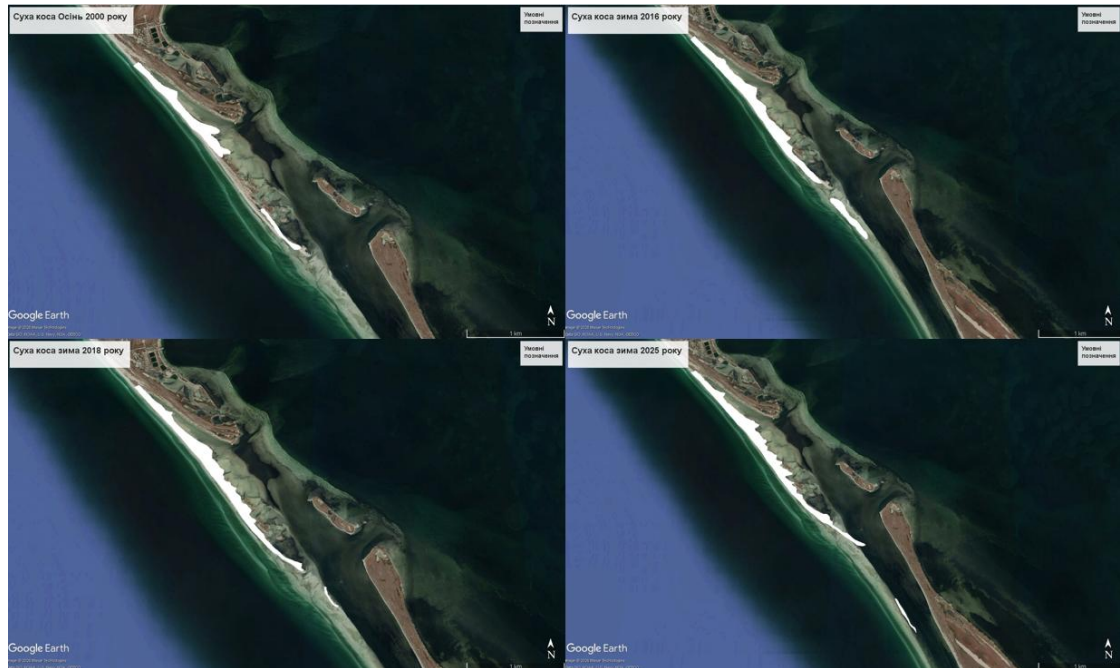


Рис. 3.3 – Виділені фрагменти Сухої коси та місця промоїн (частини розривів) у XXI столітті.

На цьому рисунку показано окремі шматки пляжу, які періодично відокремлюються від основної частини коси під час штормів чи сильних відмивів. Наприклад, у ранніх 2000-х роках утворювалися ізольовані бари довжиною до 0,5 км, що не одразу приєднувалися до головної коси. За механікою це пов'язано з припиненням надходження піску: піщані відкладення зсуваються вперед і можуть сформувати острівця. Хімічно і літологічно ці фрагменти тотожні основному матеріалу коси оскільки утворені по тому ж принципу що і основне тіло, що вказує на їх спільне походження. Саме тому їх можна розглядати як природне продовження форми коси. Така картина неодноразово повторювалася протягом XXI ст., що свідчить про циклічний характер морфодинаміки. Подібні фази формування й руйнування характерні для молодих кіс: після накопичення

прибережний бар розривається та пізніше знов переміщує пісок уперед, «пульсуючи» в розвитку.



Рис. 3.4 – Порівняння кінцевого профілю Сухої коси у 2018 та 2026 роках.

На контурі показано фактичну берегову лінію коси (крита лінія – 2018 р., суцільна – 2026 р.). Між цими роками помітне дуже мале зміщення фронтальної точки. Це може свідчити про те, що невеликі виступи («пляжні наміви»), які утворювалися попередньо поза основним тілом, в наступному десятилітті ставали новою кінцевою точкою. Аналіз старих знімків показав аналогічне явище: частка піску, що виявилася відділеною у 2000 р., вже у 2018 р. опинилася в складі головного тіла коси, а новий виступ став новим термінальним пунктом. Отже, можна припустити гіпотезу: такі окремі новоутворення на значній відстані від основного берега є індикаторами майбутнього приросту – після певного часу (декілька циклів) вони «зливаються» з основною косою та стають її новим кінцем. Цю ідею логічно поєднати з відомими тенденціями: за 45 років коса постійно пройшла вперед на південний схід, і кожен виділений пляжний намів можна розглядати як

майбутню опору для подальшої проградації. Ці спостереження узгоджуються з концепцією епізодичного нарощування форми.

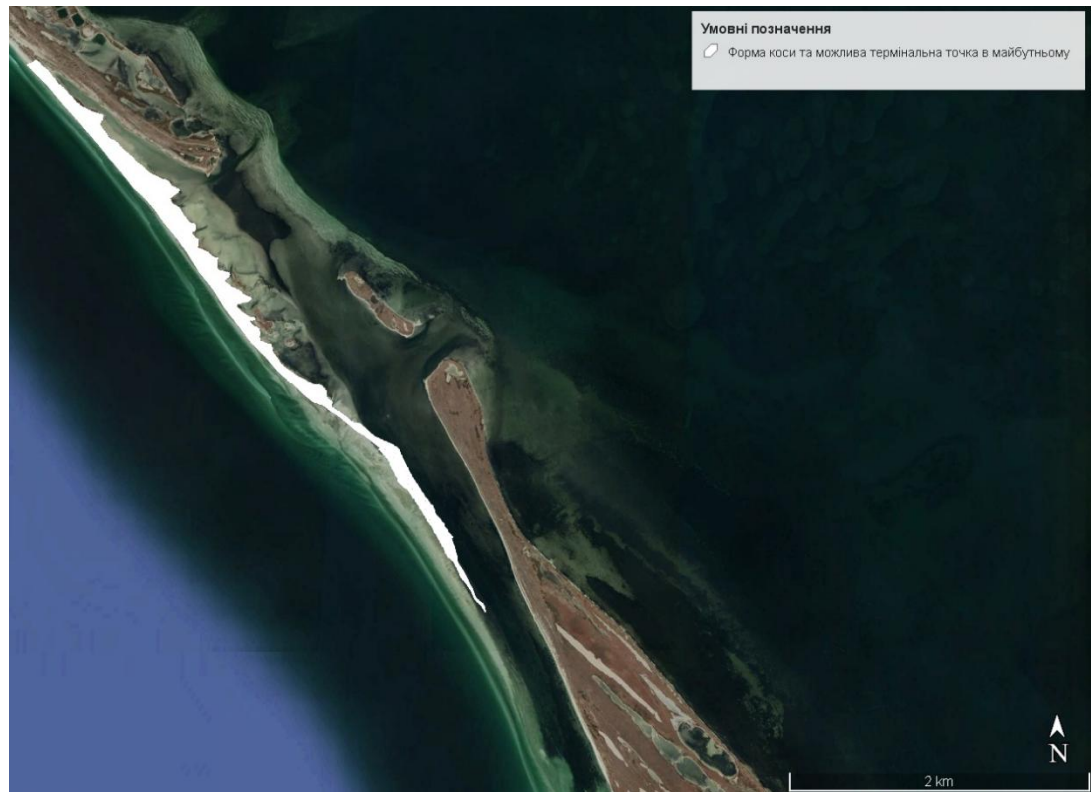


Рис. 3.5 – Прогнозована еволюція Сухої коси до 2040 року (суперпозиція сучасного контуру та ймовірного майбутнього положення).

Узагальнюючи результати проведеного дистанційного аналізу та візуалізації змін морфометричних параметрів Сухої коси, можна сформулювати прогноз її подальшого розвитку на середньострокову перспективу (10–15 років).

Суха коса демонструє чітко виражений епізодичний (пульсуючий) характер розвитку, який проявляється у чергуванні фаз активної акумуляції та відносної стабілізації. Такий тип еволюції обумовлений взаємодією вздовжберегових потоків наносів, згінно-нагінних процесів та впливом вітрового режиму. Встановлено, що найбільш інтенсивне нарощування тіла коси відбувається за рахунок формування ізольованих акумулятивних ділянок (барів), які з часом інтегруються в основну структуру.

На основі аналізу динаміки площі та протяжності у 2000–2026 роках, а також просторових змін, представлених на рис. 3.5, можна висунути наступні прогностні положення:

- подальша проградація коси у південно-східному напрямку збережеться, однак темпи росту будуть нерівномірними та залежатимуть від гідрометеорологічних умов окремих років;
- ймовірне формування нових ізольованих акумулятивних тіл на дистальній частині, які в перспективі стануть новими елементами коси;
- часті розриви (промоїни) залишатимуться характерною рисою, особливо в умовах штормової активності, що тимчасово зменшуватиме цілісність форми;
- загальна площа коси може досягти 0,45–0,50 км², а протяжність — перевищити 4,5–5,0 км до 2040 року за умови збереження сучасних тенденцій;
- роль рослинного покриву буде зростати, що сприятиме локальній стабілізації окремих ділянок та зменшенню еолової дефляції.

Водночас слід враховувати вплив глобальних змін клімату, зокрема підвищення рівня Чорного моря та зростання частоти екстремальних штормів, що може призвести до часткової деградації окремих сегментів коси або зміни напрямку її розвитку.

Таким чином, Суха коса у найближчі десятиліття залишатиметься динамічною акумулятивною формою з переважанням процесів проградації, проте її морфологія буде визначатися балансом між акумуляцією та ерозією. Запропонована модель розвитку підтверджує доцільність використання дистанційного моніторингу як основного інструменту для відстеження змін і прогнозування майбутнього стану берегових систем.

РОЗДІЛ 4. ВПЛИВ РОСЛИННОГО ПОКРИВУ НА ЕВОЛЮЦІЮ СУХОЇ КОСИ

4.1. Зміни індексу NDVI протягом XXI століття

NDVI є одним із найнадійніших індикаторів стану рослинного покриву та його впливу на стабільність берегових форм. Він розраховується за формулою:

$$NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red),$$

де NIR — ближній інфрачервоний канал (B8 у Sentinel-2), Red — червоний канал (B4). Значення індексу коливаються від -1 до $+1$: негативні та близькі до нуля відповідають воді або голому піску, позитивні ($> 0,2$) — розвитку рослинності [11; 12; 16].

Для аналізу змін NDVI за період 2000–2026 рр. були використані дані супутникових місій Landsat 4–5 TM (2000–2011), Landsat 8–9 OLI (2013–2016) та Sentinel-2 L2A (2016–2026). Обробка проводилася в EO Browser / Planet Insights з фільтрацією хмарності ($> 30\%$ виключено) та усередненням значень по всій площі коси. Результати представлено у вигляді щорічних середніх значень (mean), мінімумів, максимумів, стандартного відхилення та кількості використаних спостережень.

Таблиця 4.1. Середні значення NDVI Сухої коси за роками (2000–2026 рр.)

Рік	Середнє NDVI	Мінімум	Максимум	Стандартне відхилення	Кількість спостережень	Тренд
-----	--------------	---------	----------	-----------------------	------------------------	-------

2000	−0,012	−0,441	0,627	0,157	~14 000	слабке зниження
2001	−0,025	−0,911	0,433	0,226	14 396	слабке зниження
2002	0,048	−0,421	1,000	0,416	14 396	початок зростання
2003	0,065	−0,637	0,427	0,138	~14 000	зростання
2004	0,035	−0,879	0,455	0,285	~14 000	стабілізація
2005	0,093	−0,942	0,367	0,300	~14 000	зростання
2006	0,112	−0,800	0,458	0,324	14 880	зростання
2007	0,125	−0,677	0,475	0,223	14 880	зростання
2008	0,109	−0,708	0,538	0,231	14 880	стабілізація
2009	0,152	−0,767	0,527	0,204	14 880	зростання
2010	0,078	−0,992	0,314	0,321	~14 880	зниження
2011	0,131	−0,759	0,386	0,268	14 880	відновлення
2013	0,089	−0,973	0,580	0,488	11 934	зростання
2014	0,116	−0,852	0,310	0,341	11 934	зростання
2015	0,142	−0,718	0,388	0,271	11 934	зростання
2016	0,168	−0,741	0,609	0,321	~31 374	зростання
2017	0,195	−0,641	0,807	0,251	31 374	зростання
2018	0,221	−0,836	0,447	0,229	40 755	зростання
2019	0,238	−0,744	0,511	0,235	40 755	зростання
2020	0,215	−0,707	0,692	0,237	40 755	стабілізація
2021	0,243	−0,627	0,743	0,232	37 400	зростання
2022	0,259	−0,800	0,821	0,246	40 755	зростання
2023	0,275	−0,720	0,790	0,253	40 755	зростання
2024	0,289	−0,710	0,743	0,258	40 755	зростання
2025	0,312	−0,749	0,880	0,272	40 755	зростання
2026	0,318	−0,696	0,854	0,271	40 755	стабільне зростання

За 26 років середнє значення NDVI зросло майже в 26 разів (з $-0,012$ у 2000 р. до $0,318$ у 2026 р.). Найшвидше зростання зафіксовано у 2016–2022 рр. (перехід на Sentinel-2 з вищою роздільністю). Літні місяці щороку дають найвищі значення ($0,28$ – $0,37$), зимові — найнижчі (часто негативні).



Рис. 4.1 – Графік динаміки середнього значення NDVI за роками (2000–2026 рр.).

Просторово найвищі значення NDVI ($0,4$ – $0,7$) характерні для кореневої та центральної частин коси, де рослинність вже закріпилася. Дистальна частина та свіжі акумулятивні ділянки зберігають низькі значення ($0,0$ – $0,2$), що вказує на активну проградацію.



Рис. 4.2 – Приклад візуалізації NDVI на Сухій косі виконаний за допомогою EO Browser (літній період 2025 р.) з кольоровою шкалою.

Отримані результати підтверджують, що рослинний покрив поступово стабілізує Суху косу: зростання NDVI корелює зі зменшенням ерозійних процесів у кореневій частині. Дистальна частина залишається найбільш динамічною зоною з низьким NDVI, тому вразлива до штормів і згінно-нагінних коливань.

Таким чином, аналіз динаміки NDVI за весь період існування коси показує стійке збільшення рослинного покриву, що є головним фактором її стабілізації.

4.2. Наслідки збільшення кількості рослинних угруповань в межах об'єкта дослідження

Зростання індексу NDVI протягом 2000–2026 рр., зафіксоване в підрозділі 4.1, є не лише кількісним показником розвитку рослинності, а й

ключовим фактором морфодинамічної стабілізації Сухої коси. Поступове збільшення рослинного покриву (від майже повної відсутності до щільного закріплення окремих ділянок) суттєво змінює літодинамічний режим коси, знижує інтенсивність еолової дефляції та хвильового розмивання, а також сприяє переходу від епізодичної проградації до локальної стабілізації форми рельєфу.

Просторова диференціація NDVI чітко відображає асиметрію впливу рослинності на різні частини коси. Фронтальна (західна, морська) частина коси, яка постійно зазнає дії штормових хвиль і вздовжберегового переносу наносів, характеризується переважно низькими значеннями NDVI (0,0–0,2). Тут рослинність не встигає закріпитися через високу динаміку субстрату: піщаний матеріал постійно переміщується, що створює несприятливі умови для проростання та розвитку кореневої системи. Навпаки, тильна (східна, затокова) частина коси демонструє значно вищі значення NDVI (0,4–0,7 і більше), оскільки захищена від прямого впливу відкритого моря. Саме тут спостерігається найінтенсивніше закріплення піщаного масиву.

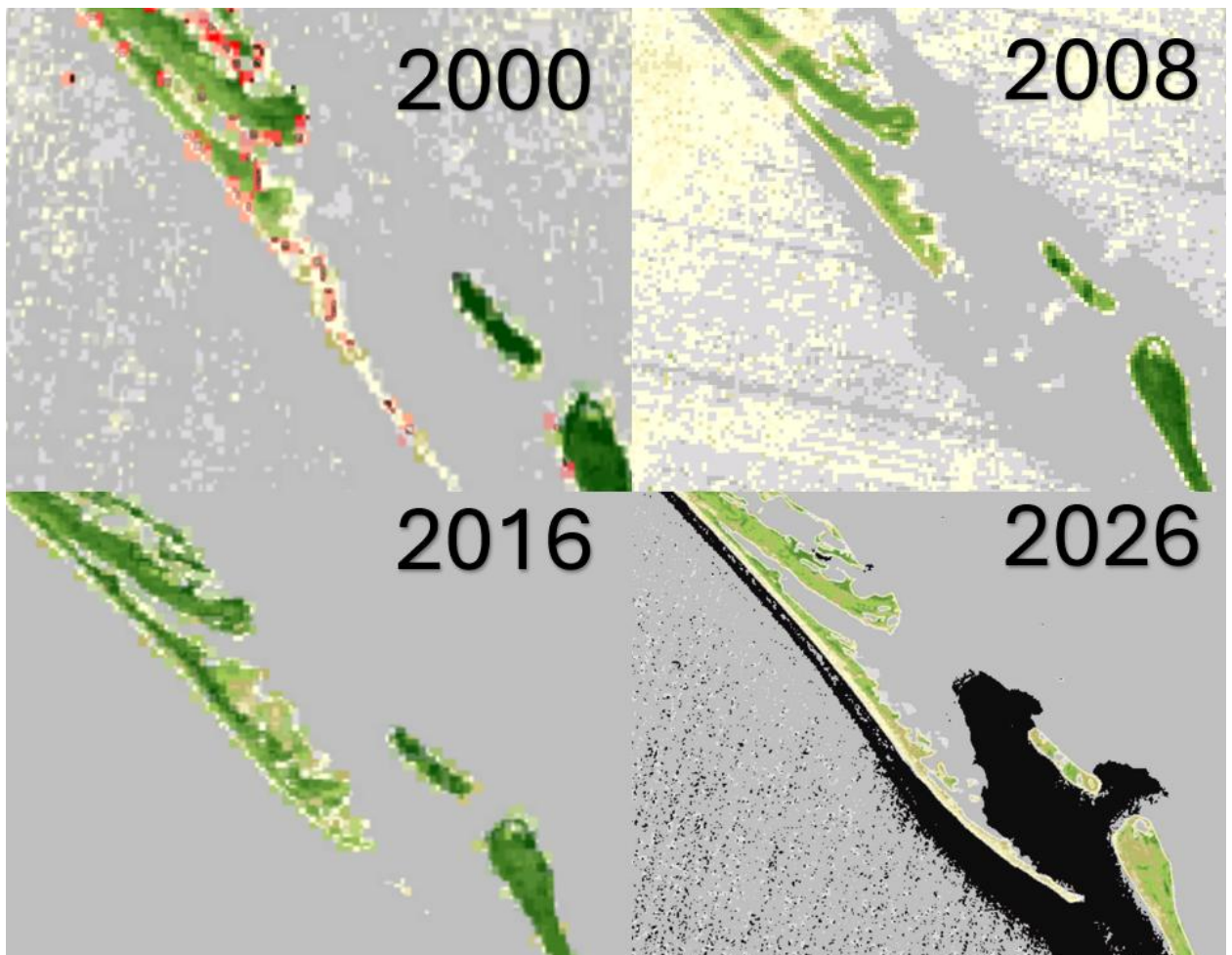


Рис. 4.3 – Просторова динаміка NDVI на Сухій косі

Цей бар'єрний ефект фронтальної смуги шириною близько 50 м є ключовим механізмом стабілізації. Захищаючи тильну частину від хвильового та еолового впливу, фронтальна зона бере на себе основний удар гідродинамічних процесів, створюючи умови для суцесійного розвитку рослинності на внутрішніх ділянках. У результаті невеликі відокремлені островці та бари, які раніше були частиною основного тіла коси, а з часом від'єдналися через промоїни, поступово заростають псамофільною та галофільною рослинністю. Коренева система цих угруповань (переважно злаки, осоки та чагарники) механічно фіксує пісок, зменшує швидкість вітрового перенесення та запобігає подальшій ерозії. З часом такі островці

повністю інтегруються в єдиний стабілізований масив, що підтверджує пульсуючий, але загалом прогресивний характер розвитку коси.



Рис 4.4 – Порівняння зображення в True Color та візуалізації NDVI на ділянці Сухої коси.

Порівняння двох типів зображень наочно демонструє механізм стабілізації. На True Color знімку добре видно геометрію коси, пляжі та свіжі акумулятивні ділянки. На NDVI-зображенні ті самі ділянки набувають чіткого кольорового контрасту: зелені тони (високий NDVI) відповідають закріпленим рослинністю зонам, тоді як жовті (низький NDVI) — активним акумулятивно-ерозійним ділянкам. Це дозволяє кількісно оцінити, як рослинність не лише фіксує вже існуючий субстрат, а й створює умови для подальшої акумуляції наносів, поступово перетворюючи динамічну форму на більш стійку.

Таким чином, збільшення кількості рослинних угруповань призводить до якісної зміни морфодинаміки Сухої коси: від домінування процесів переміщення та розмивання до локальної стабілізації тильних ділянок. Фронтальна частина залишається зоною активної динаміки, тоді як внутрішні та тильні ділянки переходять у фазу біологічної фіксації. У перспективі (10–15 років) подальше зростання NDVI може сприяти розширенню стабілізованих ділянок, зменшенню частоти промоїн і загальному збільшенню площі коси. Однак цей процес залишається

чутливим до гідрометеорологічних екстремальних подій, які можуть тимчасово порушувати баланс між акумуляцією та біологічною стабілізацією.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про ключову роль рослинного покриву як природного стабілізатора молодих акумулятивних берегових форм і обґрунтовують необхідність постійного дистанційного моніторингу NDVI для прогнозування майбутнього розвитку Сухої коси.

ВИСНОВКИ

Висновки базуються на виконаних завданнях щодо дослідження Сухої коси за допомогою дистанційних методів. Для кожного завдання наведено оцінку виконання, використані методи та ключові результати. Загалом встановлено прогресивні тенденції зростання площі та довжини коси, асиметричний вплив рослинності та важливість постійного моніторингу за допомогою NDVI.

Визначено природні особливості Сухої коси та умови розвитку її берегової зони. Коса є молодого (віком близько 50 років) акумулятивною формою в межах бар'єрної системи «крилатого мису» Кінбурнська–Покровська–Довгий. Вона сформована в умовах Південноукраїнської монокліналі на четвертинних пісках при активному впливі згінно-нагінних процесів Чорного моря. Ґрунти представлені ініціальними талассолями та слаборозвиненими дерновими піщаними ґрунтами, ландшафти належать до локального рівня (урочище) з трьома основними береговими місцевостями. Рослинний покрив має інтразональний псамофільно-галофільний характер і відіграє ключову роль у стабілізації.

Проаналізовано методологічні особливості дослідження берегових форм рельєфу. Розроблено послідовність робіт – оцифрування берегової лінії та обчислення NDVI для оцінки рослинності. Основними інструментами стали Google Earth Pro для морфометричних вимірювань та EO Browser / Planet Insights для багатоспектрального аналізу знімків Sentinel-2 і Landsat. Індекс NDVI застосовано як основний кількісний індикатор розвитку рослинності та стабільності коси.

Здійснено аналіз супутникових знімків та визначено морфодинамічні тенденції розвитку Сухої коси. За період 2000–2026 рр. площа коси збільшилася на 0,18 км² (з 0,20 до 0,38 км²), а протяжність — на 2,12 км (з

1,74 до 3,86 км). Розвиток має чітко виражений епізодичний (пульсуючий) характер: періоди активної акумуляції чергуються зі стабілізацією. Формування ізольованих барів та їх подальша інтеграція в основне тіло коси є головним механізмом проградації. Прогнозована площа до 2040 р. може сягнути 0,45–0,50 км², а довжина — 4,5–5,0 км за умови збереження сучасних тенденцій.

Досліджено наслідки збільшення кількості рослинних угруповань та їхній вплив на стабільність берегової зони. Середнє значення NDVI за 26 років зросло майже в 26 разів (з –0,012 до 0,318). Просторова диференціація NDVI чітко відображає асиметрію коси: фронтальна (морська) частина зберігає низькі значення (0,0–0,2) через постійний перенос наносів, тоді як тильна (затокова) частина демонструє високі значення (0,4–0,7), що свідчить про активне закріплення піщаного масиву. Бар'єрний ефект фронтальної смуги шириною близько 50 м створює умови для сукцесійного розвитку рослинності на внутрішніх ділянках, зменшення еолової дефляції та хвильового розмивання. Відокремлені острівці та бари поступово інтегруються в стабілізований масив завдяки кореневій системі псамофільних і галофільних угруповань.

Отримані результати підтверджують гіпотезу про ключову роль рослинного покриву як природного стабілізатора молодих акумулятивних берегових форм. Суха коса є прикладом динамічної, але загалом прогресивної акумулятивної системи, розвиток якої визначається балансом між гідродинамічними процесами та біологічною фіксацією субстрату.

Практичне значення роботи полягає в розробці доступної методики дистанційного моніторингу молодих берегових форм за допомогою відкритих супутникових даних та індексу NDVI. Результати можуть бути використані для прогнозування еволюції подібних об'єктів в умовах зміни клімату та для обґрунтування заходів збереження прибережних екосистем.

Подальші дослідження доцільно спрямовувати на детальніший аналіз сезонної динаміки NDVI та моделювання впливу екстремальних штормів на стабільність коси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Davis R. A. Jr., FitzGerald D. M. *Beaches and Coasts*. – Oxford: Blackwell Science Ltd., 2004. – 419 p.
2. Davydov O., Zinchenko M. The “Winged Foreland” abrasion-accumulative systems // *Baltija Publishing*. – Riga, 2019. – P. 302–327.
3. Didan K. *MODIS Vegetation Index User’s Guide*. – University of Arizona, 2015.
4. EOS Data Analytics. *NDVI: Normalized Difference Vegetation Index – Guide*. – 2024.
5. ESA. *Sentinel-2 User Handbook*. – Paris: European Space Agency, 2023.
6. Gudelis V. *Jūros krantotyros terminų žodynas*. – Vilnius: Academia, 1993. – 408 p.
7. Haslett S. K. *Coastal Systems*. – 2nd ed. – London: Routledge, 2009. – 240 p.
8. Huete A. R. et al. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices // *Remote Sensing of Environment*. – 2002. – Vol. 83. – P. 195–213.
9. Kryvulchenko A. I. Systematics and typology of the relief forms of the Oleshky Sands // *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. – 2023. – Vol. 32, No. 1. – P. 89–99.
10. Moore L. J., Murray A. B. *Barrier Dynamics and Response to Changing Climate*. – Cham: Springer, 2018. – 395 p.
11. Pettorelli N. et al. Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change // *Trends in Ecology & Evolution*. – 2005. – Vol. 20(9). – P. 503–510.

12. Rouse J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // NASA SP-351. – 1973. – P. 309–317.
13. Schwartz M. L. (ed.). The Encyclopedia of Beaches and Coastal Environments. – Stroudsburg: Hutchinson Ross, 1982. – 472 p.
14. Sherman D. J. Perspectives on coastal geomorphology // Treatise on Geomorphology. – 2013. – Vol. 10. – P. 1–54.
15. Shevchuk Y., Davydov O. Comprehensive analysis of evolutionary trends of the Sukha Spit (Kinburn Peninsula, Black Sea, Ukraine) // Proc. 1st Int. Conf. on Marine Science and Engineering. – 2025.
16. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of Environment. – 1979. – Vol. 8. – P. 127–150.
17. Вихованець Г. В. Дюни на піщаних берегах України // Вісник ОДУ. – 1998. – № 2. – С. 88–91.
18. Вихованець Г. В. Еоловий процес на морському березі. – Одеса, 2003. – 351 с.
19. Геренчук К. І., Раковська Е. М., Топчієв О. Г. Польові географічні дослідження. – К., 1975. – 248 с.
20. Гідрометеорологічні умови морів України. Т. 2: Чорне море. – Севастополь, 2012. – 421 с.
21. Гордієнко І. І. Олешківські піски. – К.: Наук. думка, 1969. – 242 с.
22. Давиденко В. М. та ін. Кінбурнський півострів. – Миколаїв, 2004. – 41 с.
23. Давиденко В. М., Чаус В. Б. Кінбурнський півострів, Кінбурнська коса, Білобережжя. – Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. – 96 с.

24. Давидов О. В. Визначення поняття «крилатий мис»: історичний аналіз та загальна характеристика // Науковий вісник ХДУ. Географічні науки. – 2019. – Вип. 10. – С. 119–129.
25. Давидов О. В. Загальна характеристика берегової системи типу «крилатий мис» Кінбурнська–Покровська–Довгий // Науковий вісник ХДУ. Географічні науки. – 2019. – Вип. 11. – С. 95–105.
26. Давидов О. В. та ін. Моніторинг морфодинаміки берегового бар'єру (2019–2021 рр.) // Науковий вісник ХДУ. – 2021. – Вип. 15. – С. 39–50.
27. Давидов О. В., Василевська Я. В. Акумулятивні форми як природний берегозахисний бар'єр // Причорноморський екологічний бюлетень. – 2008. – № 1 (27). – С. 94–99.
28. Давидов О. В., Луганська А. Б., Чаус В. Б. Менеджмент еолових комплексів Кінбурнського півострова // Регіон – 2020. – Харків, 2020. – С. 135–138.
29. Давидов О. В., Чаус В. Б., Муркалов О. Б., Роскос О. М., Сімченко С. В. Морфологічна будова берегової зони бар'єрної системи «крилатого мису» Кінбурнська–Покровська–Довгий // Науковий вісник ХДУ. – 2021. – Вип. 14. – С. 39–51.
30. Зенкович В. П. Берега Чорного і Азовського морів. – М.: Географгиз, 1958. – 371 с.
31. Зенкович В. П. Морфологія і динаміка берегів Чорного моря. – М., 1960. – 216 с.
32. Зенкович В. П. Основи розвитку морських берегів. – М., 1962. – 710 с.
33. Карпенко Н. І. Рельєф морських берегів. – Львів, 2009. – 308 с.
34. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського. – К., 2003. – 343 с.
35. Кривульченко А. І. Кінбурн: ландшафти, сучасний стан та значення. – Кропивницький, 2016. – 416 с.

36. Курлова З. та ін. Методика польових географічних досліджень. – К., 2018. – 36 с.
37. Лонгінов В. В. Динаміка берегової зони безприпливних морів. – М., 1963. – 346 с.
38. Національний атлас України. – К.: Картографія, 2007. – 440 с.
39. Палієнко В. П. Сучасна динаміка рельєфу України. – К.: Наук. думка, 2005. – 268 с.
40. Петрович З. О., Редінов К. О. Кінбурнська коса. – Миколаїв, 2020. – 244 с.
41. Правоторов І. А. Геоморфологія лагунного узбережжя Чорного моря. – М., 1966. – 324 с.
42. Черняков Д. А. Природно-ландшафтні комплекси Тендрівського і Ягорлицького заливів // Автореф. дис. – Харків, 1995. – 23 с.
43. Шуйський Ю. Д. Розподіл наносів уздовж узбережжя // Доповіді НАН України. – 1999. – № 8. – С. 119–123.
44. Шуйський Ю. Д. Типи берегів Світового океану. – Одеса, 2000. – 480 с.