

УДК 551

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1\(46\).332413](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2025.1(46).332413)

О. Є. Кузьменко¹, аспірантка,

С. В. Кадурін², канд. геол. наук, доцент,

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,

кафедра морської геології, гідрогеології, інженерної

геології та палеонтології,

пров. Шампанський, 2, м. Одеса, 65058, Україна

¹sashakuzmenko0987654321@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0000-3479-2892>

²kadurins@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0691-1828>

МОРФОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПІДВОДНОГО РЕЛЬЄФУ В РАЙОНІ УКРАЇНСЬКОЇ АНТАРКТИЧНОЇ СТАНЦІЇ «АКАДЕМІК ВЕРНАДСЬКИЙ» ЯК ОСНОВА ДЛЯ ОЦІНКИ УМОВ ОСАДКОНАКОПИЧЕННЯ

У роботі представлені результати морфометричного аналізу підводного рельєфу в районі Української антарктичної станції «Академік Вернадський». Дані, отримані під час Українських Антарктичних морських експедицій 2022–2025 років на цій території, роблять можливим проведення таких досліджень з високим ступенем детальності. За допомогою морфометричного аналізу цифрової моделі рельєфу визначено особливості сучасного осадконакопичення та виявлено ділянки ймовірного накопичення верхньоплейстоцен – голоценових відкладів в акваторії Антарктичного півострова (район Української антарктичної станції «Академік Вернадський»).

Ключові слова: осадконакопичення, цифрова модель рельєфу, морфометричний аналіз, Українська антарктична станція «Академік Вернадський».

ВСТУП

Проведення геологічних досліджень Антарктики є необхідним для розуміння геологічної історії планети в цілому, і зокрема палеокліматичних умов Землі. Одним з напрямків таких досліджень є вивчення морського осадконакопичення цієї території, адже донні відклади фактично є записом кліматичних змін нещодавнього геологічного минулого. Особливо актуальні такі дослідження в контексті сучасних змін клімату планети, і зокрема в районі Антарктичного півострова, який на даний момент є одним з регіонів Землі, які переживають найстрімкіше потепління (Vaughan та ін., 2003).

Проведення таких досліджень стає можливим завдяки функціонуванню Українській антарктичній станції «Академік Вернадський» та обслуговуючого її криголама «Ноосфера», облаштованого устаткуванням для проведення морського пробовідбору, зокрема донних відкладів. Тому Українська антарктична станція «Академік Вернадський» є однією з небагатьох комплексних станцій, що мають можливість проведення морських геологічних досліджень. Експе-

диційні сезони 2022–2025 років дозволили провести точковий донний пробо-відбір і підготувати необхідну базу для створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР). В Звіті про науково-дослідну роботу (НДР) “Вивчення умов осадконакопичення та їх змін у геологічному минулому в районі Антарктичного півострова” (2023) викладено результати моделювання умов морського осадконакопичення цієї території, і показано, зокрема, що накопичення сучасних донних відкладів можливе у доволі невеликій кількості ділянок.

Морфологія морського дна є одним із ключових факторів, що визначають просторовий розподіл та інтенсивність осадконакопичення, тому морфометричний аналіз підводного рельєфу в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський” є необхідним підґрунтям для планування раціонального морського пробо-відбору, коректної оцінки сучасних умов морського осадконакопичення цієї території, та реконструкції умов седиментації в пізньому плейстоцені – голоцені.

Мета роботи: визначення особливостей динаміки сучасного осадконакопичення на основі морфометричного аналізу та виявлення ділянок ймовірного накопичення верхньоплейстоцен – голоценових відкладів в акваторії Антарктичного півострова (район Української антарктичної станції “Академік Вернадський”).

Для досягнення поставленої мети було вирішено наступні задачі:

- Підготувати цифрову модель підводного рельєфу в акваторії Антарктичного півострова (район станції “Академік Вернадський”);
- Виконати морфометричний аналіз рельєфу дна на основі отриманої моделі;
- Розрахувати гідрографічні та топографічні індекси за цифровою моделлю рельєфу для ідентифікації ділянок акумулятивного типу;
- Визначити найбільш імовірні ділянки осадконакопичення, транзиту осадків та денудації.

Предмет дослідження – рельєф дна акваторії в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський”.

Об’єкт дослідження – морфометричні характеристики підводного рельєфу та їх вплив на умови осадконакопичення в акваторії Антарктичного півострова.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для отримання цифрової моделі рельєфу району Української астанції “Академік Вернадський” використані батиметричні мореплавні карти цього району масштабів від 1:50000 до 1:15000, а також результати вимірювання глибин, що виконані з використанням ехолоту-картплоттеру Lowrance Elite-7 Ti2 з борту судна “Зодіак” під час Української Антарктичної морської експедиції в 2022 році в акваторії Антарктичного півострова в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський”. Всього загальна протяжність профілів ехолотування склала 68332,5 метрів і 90912 точки проміру глибин. Дослідження

виконувались Національним антарктичним науковим центром МОН України, спільно з представниками кафедри морської геології, гідрогеології, інженерної геології та палеонтології Одеського національного університету ім. І.І. Мечникова. Результати досліджень викладені в Звіті про науково-дослідну роботу (НДР) “Вивчення умов осадконакопичення та їх змін у геологічному минулому в районі Антарктичного півострова” (2023).

Аналіз сучасного підводного рельєфу виконаний за допомогою морфометричного метода, який передбачає використання комп’ютерних технологій просторового аналізу (Spatial Analysis). Побудова цифрової моделі рельєфу, її обробка та візуалізація отриманих результатів здійснювалися у програмному середовищі Esri ArcGIS, із залученням пакету SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses), який забезпечував виконання поглибленого морфометричного аналізу та обчислення гідрографічних (індекс конвергенції, накопичення потоку) та топографічних індексів (індекс топографічного положення, закриті депресії).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Українська антарктична станція “Академік Вернадський” розташована на острові Галіндез групи Аргентинських островів, які відносяться до архіпелагу Вільгельма, відокремленого протокою Пенола від півострову Київ західного узбережжя Антарктичного півострова (рис. 1).

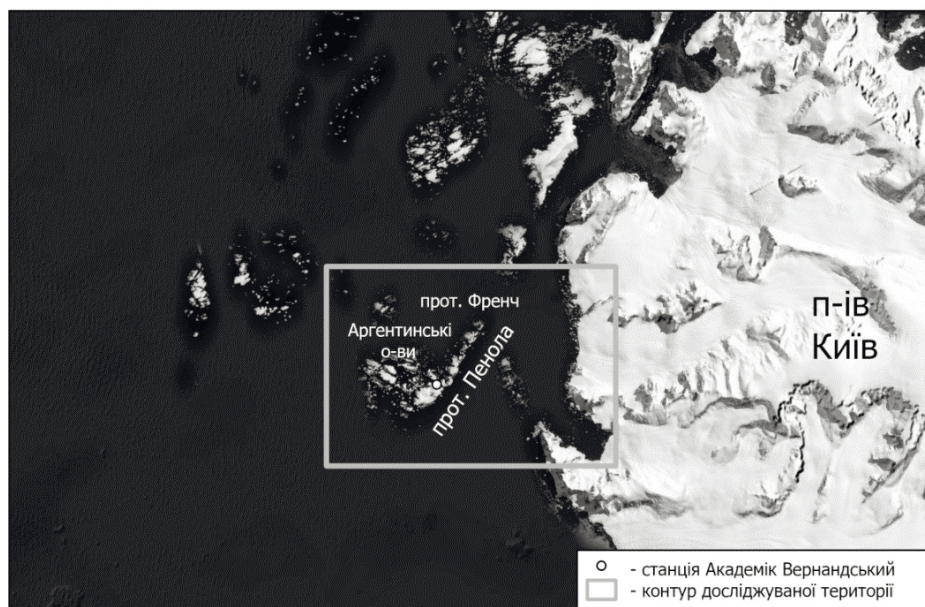


Рис. 1. Район дослідження

В рамках вирішення першої задачі, на основі даних, отриманих під час Української Антарктичної морської експедиції 2022 року, та з використанням батиметричних мореплавних карт цього району, була створена цифрова модель рельєфу (рис. 2) в системі координат UTM WGS84 (zone 20S), яка стала основою для всіх подальших просторових розрахунків.

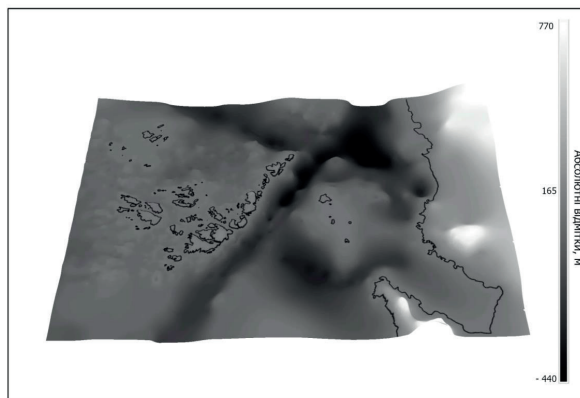


Рис. 2. Цифрова модель рельєфу акваторії Антарктичного півострова в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський” (вертикальний масштаб збільшено в 2 рази)

Рельєф дна акваторії Антарктичного півострова в районі станції Академік Вернадський має складну морфологію. Підводні западини, зокрема протоки Пенола і Френч, мають круті схили та відносно пласке дно. Абсолютні відмітки найбільш глибоководних ділянок в місці з’єднання проток Пенола і Френч, становлять 400 м нижче рівня моря, тоді як на сході досліджуваної території в межах півострова Київ абсолютні відмітки сягають понад 750 м над рівнем моря.

Для вирішення наступної задачі, на основі побудованої цифрової моделі рельєфу було виконано розрахунок ключових морфометричних показників та індексів, які дозволяють деталізувати структуру підводного рельєфу та виявити ділянки, потенційно сприятливі для накопичення відкладів. Результати цих розрахунків представлені у вигляді серії тематичних карт, що відображають просторовий розподіл морфометричних показників, що визначають параметри седиментогенезу – нахил поверхні, експозиція нахилу, стандартна кривизна рельєфу, а також індексів – індекс конвергенції, накопичення потоку, індекс топографічного положення та ін.

Для характеристики швидкості переміщення осадового матеріалу розраховано нахил поверхні рельєфу, тобто зміну висоти поверхні за одиницю горизонтальної відстані (рис. 3, А). На ділянках з незначним нахилом поверхні створюються умови, що сприяють осадконакопиченню, і навпаки, ділянки із значним нахилом поверхні є зоною прискореного транзиту відкладів – для до-

сліджуваної території такими зонами є схили проток Пенола та Френч. Для характеристики напрямку переміщення осадів вздовж схилів було розраховано направленість (експозицію) підводних схилів (рис. 3, Б).

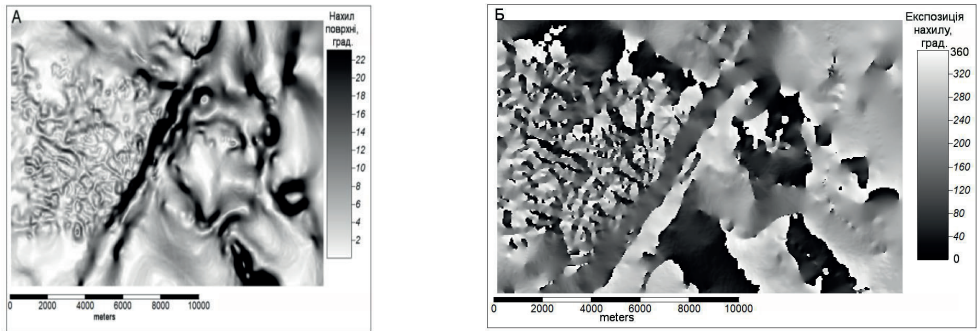


Рис. 3. Кути нахилу поверхні рельєфу (А) та направленість схилів (Б) досліджуваної території

Ще однією характеристикою рельєфу, що визначає умови накопичення відкладів є кривизна поверхні за профілем (рис. 4, А) і в плані (рис. 4, Б). Профільна кривизна відображає зміну нахилу вздовж схилу і характеризує ділянки прискорення або уповільнення поверхневого потоку осадової речовини. Негативні значення вказують на випуклі форми рельєфу, де відбувається уповільнення потоків, а позитивні – на увігнуті ділянки, де відбувається прискорення потоків. Планова кривизна показує зміну напрямку схилу поперек схилу, і дозволяє ідентифікувати лінійні форми збіжності (негативні значення) і розбіжності (позитивні значення) потоку. Як видно з рис. 4, схили підводного рельєфу в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський” ускладнені зонами сповільнення і прискорення потоків.

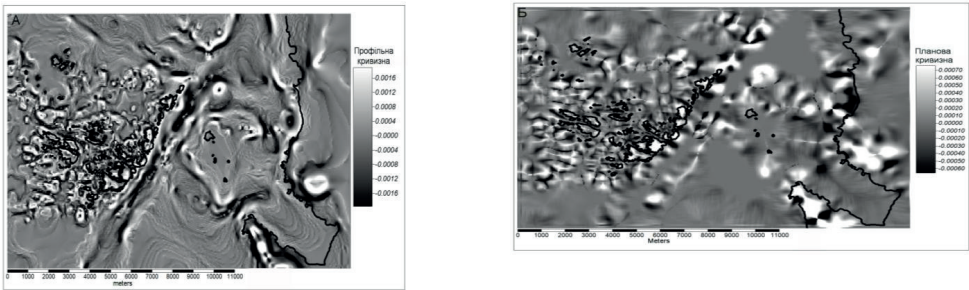


Рис. 4. Кривизна рельєфу за профілем (А) і в плані (Б) досліджуваної території

Для ідентифікації зон розбіжності чи злиття потоків використовують також індекс конвергенції (Convergence Index). Визначається індекс конвергенції на основі направленості (експозиції) схилів в комірках ЦМР (Köthe та Lehmeier, 1994), шляхом усереднення напрямків нахилу сусідніх комірок від напрямку центральної комірки та віднімання 90° . Можливі значення індексу варіюються від -90° до $+90^\circ$. Негативні значення відповідають зонам злиття потоків, а позитивні – зонам потоків, що розходяться. Рис. 5 показує результати розрахунку індексу конвергенції для досліджуваної території. Як видно з рисунку, зони злиття потоків відповідають осевій частині проток Пенола та Френч, протокам між Аргентинськими островами, та декільком зонам складної конфігурації в улоговинах біля берегів півострова Київ.

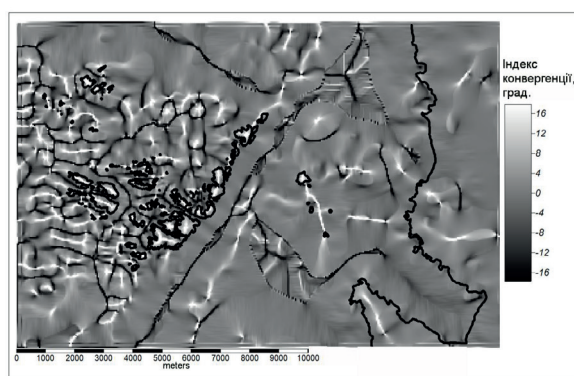


Рис. 5. Індекс конвергенції, розрахований для рельєфу досліджуваної території

Для аналізу накопичення потоків осадової речовини (Flow Accumulation) використовують алгоритм трасування, який відстежує потік кожної комірки ЦМР окремо, поки він остаточно не залишить межі ЦМР або не завершиться у внутрішній депресії. Значення накопичення потоків відображають площу збору (в m^2), що акумулюється в кожній клітинці, та вказують на морфологічно сприятливі для накопичення осадових матеріалів зони, а також дають відносну попередню оцінку кількості осадового матеріалу, що може поступати в ту чи іншу зону осадконакопичення.

Як видно з рис. 6, серед морфологічно сприятливих для накопичення осадових матеріалів зон можна визначити не тільки найглибоководніші ділянки проток Пенола і Френч, а і ряд інших зон, найбільші з яких розташовані між протокою Пенола та узбережжям півострова Київ.

Для визначення улоговин, які не мають виходу потоку, а отже створюють умови для накопичення відкладів, побудована карта закритих депресій (рис. 7).

Ще одним підходом до морфометричного аналізу рельєфу є розрахунок індексу топографічного положення (Topographic Position Index).

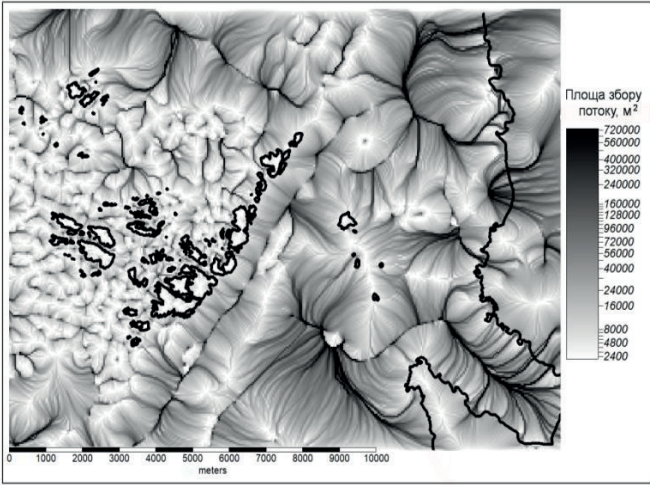


Рис. 6. Накопичення потоку, розраховане для рельєфу досліджуваної території

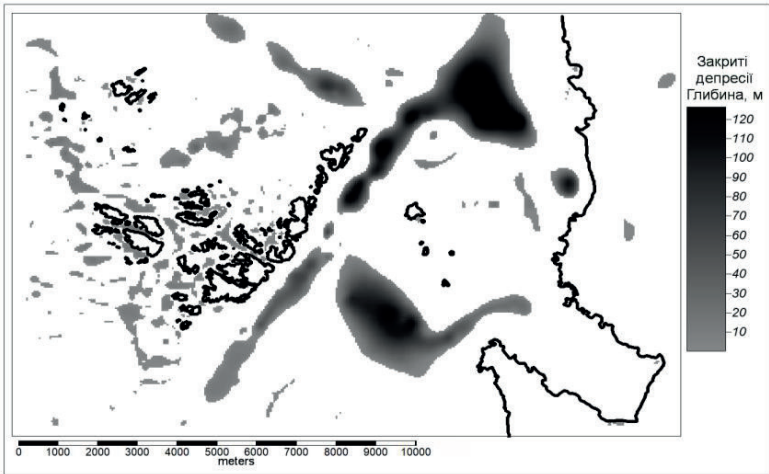


Рис. 7. Закриті депресії підводного рельєфу досліджуваної території

Індекс топографічного положення дозволяє визначити положення конкретної комірки ЦМР відносно оточуючих її комірок. Розраховується як різниця між висотою центральної комірки та середнім значенням висот навколишніх комірок (Guisan, Weiss, & Weiss, 1999). Додатні значення індексу топографічного положення відповідають позитивним формам рельєфу, від'ємні значення – депресіям, а близькі до 0 значення вказують на відносно рівну поверхню або схил (рис. 8).

Інтерпретація значень індексу топографічного положення та нахилу поверхні дозволяє визначити основні морфологічні елементи рельєфу. Для досліджу-

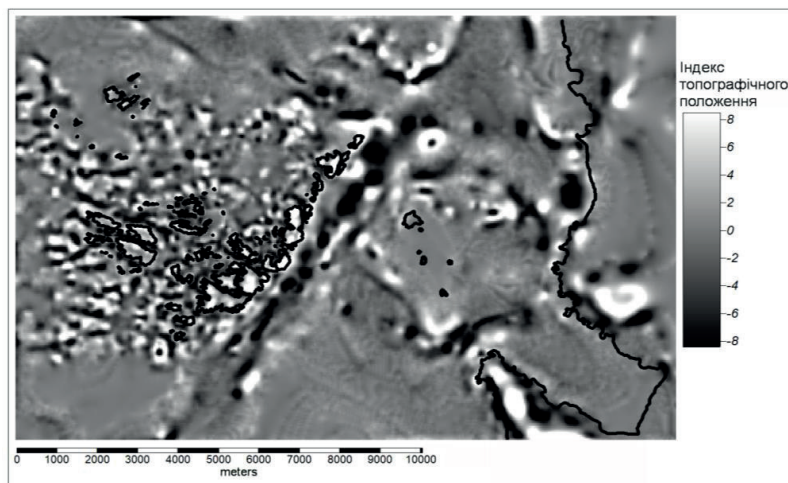


Рис. 8. Індекс топографічного положення, розрахований для рельєфу досліджуваної території

ваної території таку інтерпретацію виконано за допомогою інструменту TPI Based Landform Classification в автоматизованому режимі, з метою уникнення суб'єктивності результатів. Результати класифікації відображені на рис. 9. Як видно з рис. 9 в рельєфі акваторії Антарктичного півострова в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський” можна виділити декілька улоговин, які є основними ділянками морського осадконакопичення, зокрема улоговини проток Пенола і Френч, а також улоговини на схід від протоки Пенола поблизу узбережжя півострова Київ. В районі Аргентинських островів ділянками можливого осадконакопичення будуть локальні дрени.

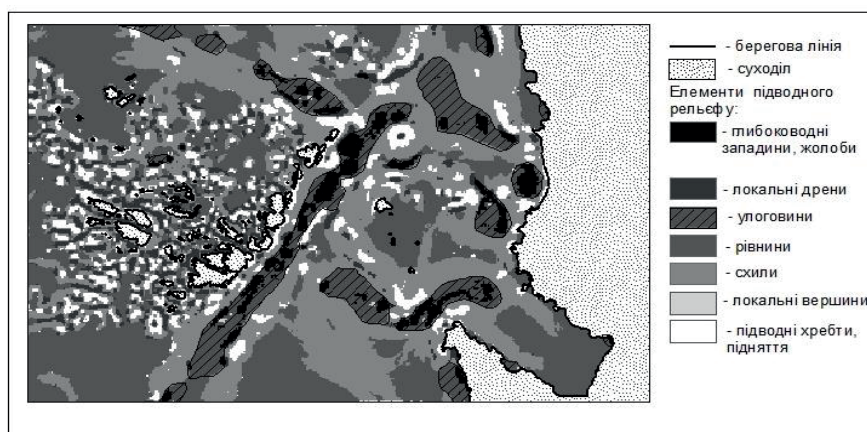


Рис. 9. Елементи підводного рельєфу досліджуваної території

Основними ділянками транзиту осадових є підводні схили, а рівнинні зони від-
повідають ділянкам сповільнення осадових потоків.

Підводні і надводні хребти та підняття є ділянками денудації, звідки в ре-
зультаті ерозійних процесів осадовий матеріал транспортується до зон осадко-
накопичення. Такими ділянками є зокрема Аргентинські острови, зосередже-
ні на північному-заході вздовж протоки Пенола, та гірські хребти півострова
Київ, з яких можна очікувати найбільші потоки осадового матеріалу.

Таким чином, для досліджуваної території можна визначити декілька най-
більш імовірних ділянок накопичення верхньоплейстоцен – голоценових мор-
ських осадових відкладів (рис. 10):

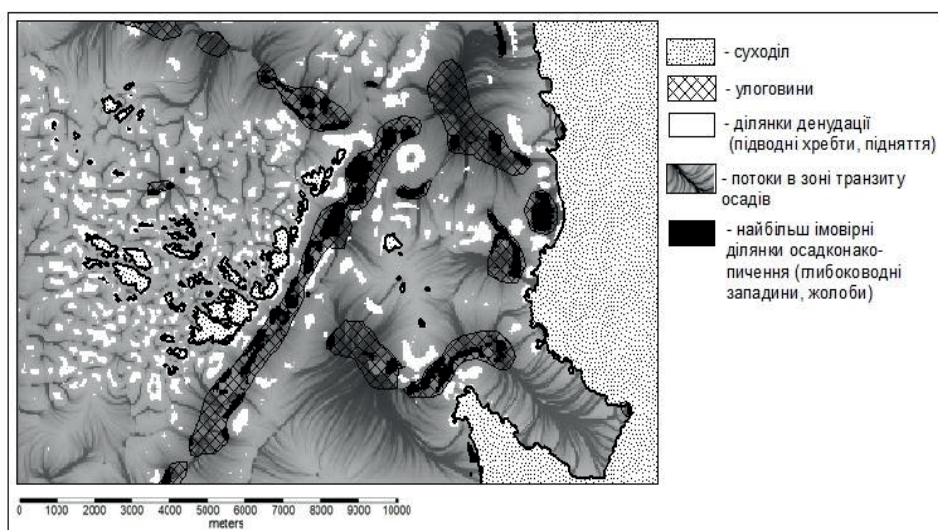


Рис. 10. Підсумкова модель переміщення і накопичення

- найглибоководніші ділянки протоки Френч, зокрема в місці її з'єднання з протокою Пенола, та північно-західної частини протоки Пенола, куди осадовий матеріал може поступати з Аргентинських островів і навколишніх підводних підняття;
- улоговини, що розташовані між протокою Пенола і узбережжям півострова Київ, куди осадовий матеріал може поступати з півострова Київ та навколишніх підводних підняття. Ці улоговини мають меншу глибину, ніж протока Пенола, натомість мають більшу площу збору потоків осадових;
- локальні дрени в районі Аргентинських островів, що можуть отримувати потоки осадового матеріалу з Аргентинських островів.

ВИСНОВКИ

Рельєф акваторії Антарктичного півострова в районі Української антарктичної станції “Академік Вернадський” має складну морфологію і є одним із ключових факторів, що визначають просторовий розподіл та інтенсивність осадконакопичення.

З використанням батиметричних мореплавних карт і результатів вимірювання глибин під час Української Антарктичної морської експедиції в 2022 році, для цієї території було створено цифрову модель рельєфу, яка послугувала основою для всіх подальших просторових розрахунків.

З метою коректної оцінки сучасних умов морського осадконакопичення цієї території та реконструкції умов седиментації в пізньому плейстоцені – голоцені виконано аналіз підводного рельєфу, який включав розрахунок ключових морфометричних показників та гідрографічних і топографічних індексів, – нахилу та направленості схилів, кривизни рельєфу за профілем і в плані, індексу конвергенції, накопичення потоку, закритих депресій, індексу топографічного положення – просторовий розподіл яких представлений у вигляді серії тематичних карт.

Встановлено, що основними ділянками денудації є Аргентинські острови і навколишні підводні підняття, та гірські хребти півострова Київ. Найбільш потужні відклади морського осадового матеріалу можна очікувати в найглибоководніших частинах проток Пенола і Френч, а також в декількох улоговинах між протокою Пенола та півостровом Київ. Локальними ділянками накопичення осадів є також дрени в районі Аргентинських островів.

Подальші дослідження необхідно зосередити на зіставленні отриманих морфометричних даних із результатами відбору та аналізу проб донних відкладів, що дозволить не лише підтвердити встановлені ділянки накопичення осадів, а й виконати математичне моделювання процесу осадконакопичення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Кадурін С.В., Ольштинська О.П., Педан Г.С., Шаталін С.М. Вивчення умов осадконакопичення та їх змін у геологічному минулому в районі Антарктичного півострова: звіт про НДР/ Одеський національний університет імені І.І. Мечникова, 2023. 94 с.

Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D. (1999): GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107–122.

Köthe, R., F. Lehmeier, 1994, SARA System zur Automatischen Relief-Analyse, Benutzerhandbuch, Göttingen
Vaughan, David & Marshall, Gareth & Connolley, William & Parkinson, Claire & Mulvaney, Robert & Hodgson, Dominic & King, John & Pudsey, Carol & Turner, John. (2003). Recent Rapid Regional Climate Warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*. 60. 243–274. <https://dx.doi.org/10.1023/A:1026021217991>

REFERENCES

Kadurin S.V., Olshtynska O.P., Pedan H.S., Shatalin S.M. (2023) Vyvchennia umov osadkonakopychennia ta yikh zmin u heolohichnomu mynulomu v raioni Antarktychnoho pivostrova: zvit pro NDR (Study of Sediment Accumulation Conditions and Their Changes in the Geological Past in the Area of the Antarctic Peninsula: Research Report)ю Odesa I.I. Mechnikov National University. [in Ukrainian]

Guisan, A., Weiss, S.B., Weiss, A.D. (1999): GLM versus CCA spatial modeling of plant species distribution. *Plant Ecology* 143: 107–122.

Kothe, R., F. Lehmeier (1994) SARA System zur Automatischen Relief-Analyse, Benutzerhandbuch (SARA System for Automatic Relief Analysis, User Manual), Gottingen. [in German]

Vaughan, David & Marshall, Gareth & Connolley, William & Parkinson, Claire & Mulvaney, Robert & Hodgson, Dominic & King, John & Pudsey, Carol & Turner, John. (2003). Recent Rapid Regional Climate Warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change*. 60. 243–274. <https://dx.doi.org/10.1023/A:1026021217991>

Надійшла 02.04.2025

O. Y. Kuzmenko

S. V. Kadurin

Odesa I. I. Mechnikov National University, Ukraine,

Department of Marine Geology, Hydrogeology, Engineering Geology and

Paleontology

2 Shampanskyi Ln, Odesa, 65058, Ukraine

kadurins@gmail.com

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF THE SUBMARINE RELIEF IN THE AREA OF THE UKRAINIAN ANTARCTIC STATION “AKADEMIK VERNADSKY” AS A BASIS FOR THE ASSESSMENT OF SEDIMENTATION CONDITIONS

Abstract

Problem Statement and Purpose. The morphology of the seafloor is one of the key factors determining the spatial distribution and intensity of sedimentation. Therefore, morphometric analysis of the submarine relief in the area of the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky” provides a necessary basis for an accurate assessment of the present-day marine sedimentation conditions in this region and for the reconstruction of sedimentary environments during the Late Pleistocene–Holocene. The aim of this work is to identify the characteristics of modern sedimentation using morphometric analysis and to detect areas of probable accumulation of Upper Pleistocene–Holocene deposits in the marine area of the Antarctic Peninsula (in the vicinity of the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky”).

Data & Methods. The research was carried out using bathymetric nautical maps of the Akademik Vernadsky Station area at scales ranging from 1:50 000 to 1:15 000, as well as depth measurements obtained with a Lowrance Elite-7 Ti2 echo sounder-chartplotter from aboard the “Zodiac” vessel during the Ukrainian Antarctic Marine Expedition in 2022, conducted in the coastal waters of the Antarctic Peninsula near the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky”. The analysis of the modern seafloor topography was performed using the morphometric method, which involves the application of spatial analysis technologies. The construction of the digital elevation model (DEM), its processing, and visualization of the obtained results were carried out using Esri ArcGIS software, with the involvement of the SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) package.

Results. The seafloor relief of the Antarctic Peninsula in the area of the Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky” is characterized by a complex morphology. A detailed analysis of the submarine topography was carried out, including the

calculation of key morphometric parameters and indices—slope and aspect, profile and plan curvature, convergence index, flow accumulation, closed depressions, and topographic position index—the spatial distribution of which is presented as a series of thematic maps. This approach made it possible to identify the most probable zones of sediment accumulation, sediment transit, and denudation. The main denudation areas are the Argentine Islands and the surrounding submarine uplands, as well as the mountainous ridges of the Kyiv Peninsula. The greatest thickness of marine sediments is expected in the deepest parts of the Penola and French Straits, as well as in several depressions between the Penola Strait and the Kyiv Peninsula.

Key words: sediment accumulation, digital elevation model (DEM), morphometric analysis, Ukrainian Antarctic Station “Akademik Vernadsky”.