

УДК 551

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.1\(48\).363292](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.1(48).363292)

А. Є. Кузьменко¹, аспірантка,

С. М. Шаталін², ст. викладач,

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,

кафедра морської геології, гідрогеології, інженерної геології та палеонтології,
Шампанський пров. 2, м. Одеса, 65058, Україна;

¹annzno18@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3240-1362>

²shatalin@onu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1596-0800>

ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКИ МОРФОМЕТРИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ В ПІДВОДНІЙ ТА НАДВОДНІЙ ЧАСТИНАХ СХИЛУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я

У роботі представлені результати встановлення просторових закономірностей морфологічної будови берегової зони північно-західного Причорномор'я, що характеризують систему «надводний схил – підводний схил», шляхом багато-параметричного статистичного аналізу морфометричних показників. Проаналізовано особливості розподілу морфометричних показників вздовж узбережжя, взаємозв'язки між ними, а також фактори, що впливають на їх формування та розподіл. Проведено типізацію берегової зони за морфометричними показниками шляхом кластеризації методом К-середніх.

Ключові слова: геоморфологія морських берегів, Одеська область, субаквальна частина узбережжя, субаеральна частина узбережжя.

ВСТУП

Прибережні території морів мають надзвичайно важливе природне, культурне та економічне значення. Водночас ці території відзначаються надзвичайно складними інженерно-геологічними умовами, що пов'язано з розвитком тут небезпечних берегових процесів, таких як зсуви, обвали та абразія. Крім того, берегові процеси в значній мірі пов'язані з розподілом мейобентосних організмів і в певній мірі впливають і на їх розподіл на значних глибинах на шельфі. Саме тому довкола проблем прибережних територій зосереджено багато наукових досліджень.

Результати дослідження узбережжя Чорного моря ґрунтовно висвітлені у низці наукових робіт, зокрема визначено основні закономірності розвитку вздовжберегового потоку наносів в береговій зоні (Шуйський & Орган, 2017), здійснено кількісну оцінку втрат та приросту прибережних територій (Cherkez et al., 2022; Medinets et al., 2022), розраховано та проаналізовано стійкість схилів, а також розроблено інженерно-геологічне районування узбережжя (Зелінський та ін., 1993). При чому в більшості робіт субаеральна та субаквальна частини узбережжя північно-західного Причорномор'я розглядаються ізольовано одна від одної та мають окрему тривалу історію та методологію дослідження,



хоча динаміка берегової зони визначається взаємодією комплексу чинників, де морфологія надводної та підводної частин схилу взаємопов'язані та відіграють важливу роль у формуванні небезпечних екзогенних процесів.

В зв'язку з цим **метою** даної роботи є встановлення просторових закономірностей морфологічної будови берегової зони північно-західного Причорномор'я, що характеризують систему «надводний схил — підводний схил», шляхом багатопараметричного статистичного аналізу морфометричних показників.

Для досягнення поставленої цілі необхідно виконати наступні **задачі**:

- формування цілісної цифрової моделі рельєфу надводної і підводної частини узбережжя північно-західного Причорномор'я шляхом інтеграції даних дистанційного зондування, ехолотних вимірювань у прибережній зоні та архівних батиметричних даних, побудова поперечних профілів рельєфу вздовж узбережжя;

- ідентифікація основних структурних елементів схилу (бровки та підшви) для побудованих профілів рельєфу та розрахунк морфометричних характеристик схилів;

- встановлення просторових закономірностей та кореляційних залежностей між морфометричними показниками надводної та підводної частин схилу з подальшою статистичною типізацією та районуванням ділянок узбережжя;

- визначення факторів, що впливають на формування та розподіл морфометричних параметрів схилів.

Об'єктом дослідження обрано ділянку північно-західного узбережжя Чорного моря загальною протяжністю близько 90 км, що охоплює територію від с. Санжійка Одеської області до с. Рибаківка Миколаївської області.

Предмет дослідження — варіативність морфометричних параметрів берегової зони.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Матеріали

У процесі дослідження для побудови цілісної цифрової моделі рельєфу надводної і підводної частини узбережжя північно-західного Причорномор'я використовувалися:

- 1) Цифрова модель рельєфу SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільною здатністю 30 м для побудови надводного рельєфу. Варто враховувати, що використання ЦМР SRTM із просторовою роздільною здатністю 30 м накладає певні обмеження на деталізацію мікроформ рельєфу. Для крутих берегових схилів та вузьких зсувних терас така роздільність може призводити до генералізації рельєфу та згладжування екстремальних значень ухилу. Проте вибір цього джерела даних обумовлений необхідністю забезпечення покриття для всієї досліджуваної ділянки узбережжя протяжністю 90 км, що є достатнім для регіонального статистичного аналізу та типізації. На сьогодні

SRTM залишається найбільш актуальним та достовірним джерелом відкритих даних такого масштабу з суцільним покриттям території дослідження.

2) Дані вимірювань глибини, що виконані у рамках науково-дослідних робіт «Дослідження сучасного інженерно-геодинамічного стану дна та берегової смуги північно-західної частини Чорного моря. Тема № 593» з використанням ехолоту — картплоттеру Lawrence Elite Ti2-7, та батиметричні спостереження, виконані ДУ «Держгідрографія» у масштабах від 1:50 000 до 1:10 000, для побудови підводного рельєфу.

Методи

На першому етапі дослідження дані про абсолютні відмітки надводної та підводної частини узбережжя було об'єднано у єдиний шар, за допомогою якого будувалася цифрова поверхня рельєфу з роздільною здатністю 30 метрів на 1 піксель поверхні, тобто за одну точку розрахунку приймається площа 900 м² (30*30 м).

З побудованої цифрової моделі рельєфу знімалися абсолютні відмітки поверхні по перпендикулярним до берега профілям довжиною 9000 м, що побудовані на відстані 500 м один від одного (рис. 1).

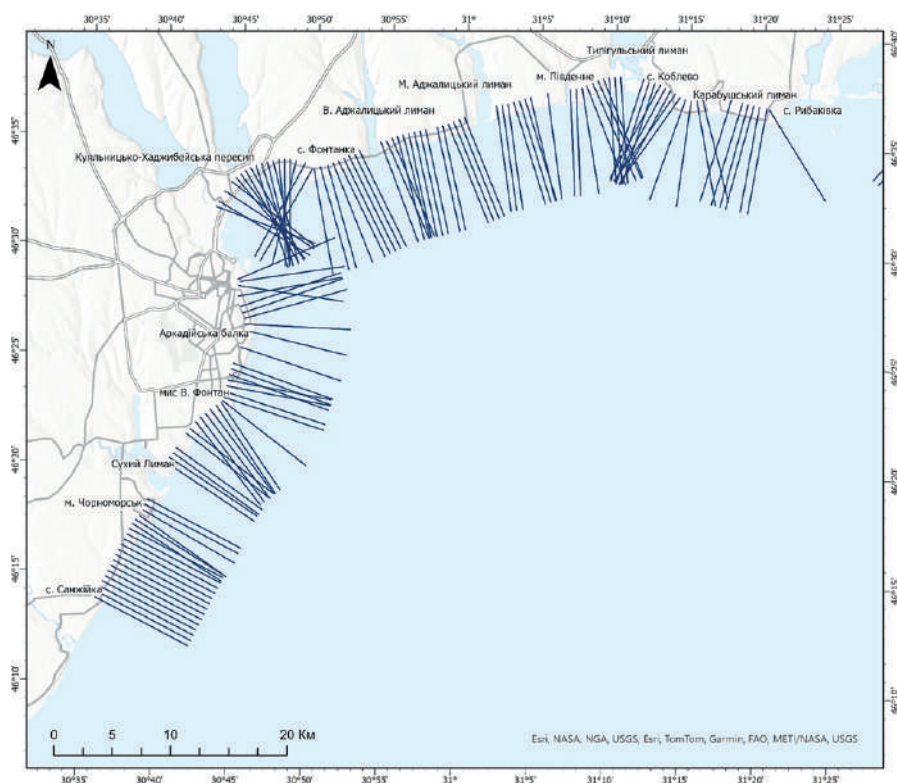


Рис. 1. Схема розташування профілів рельєфу

Зі сформованої вибірки профілів було виключено ділянки акумулятивних форм рельєфу та гирлові зони лиманів, що обумовлено відсутністю батиметричних даних безпосередньо в акваторіях лиманів, а також недостатньою роздільною здатністю та наявністю артефактів у вхідних даних дистанційного зондування, що критично на ділянках із незначною амплітудою висотних відміток.

Далі для кожного профілю визначалися основні структурні елементи берегової зони, а саме плато, брівка схилу, зсувний схил, підощва схилу, пляж та підводна частина схилу.

Для об'єктивної ідентифікації брівки та підощви схилу, застосовано алгоритм кусочно-лінійної апроксимації (Piecewise Linear Approximation) профілю.

Ідея методу кусочно-лінійної апроксимації полягає в тому, що реальний профіль рельєфу замінюється ламаною лінією, що складається з відрізків. Аналіз починається з перших двох точок профілю, покроково додаючи наступні точки, будуються лінії регресії для кожного поточного відрізка методом найменших квадратів. З додаванням кожної нової точки змінюється нахил лінії регресії (кутовий коефіцієнт). Межа сегменту фіксується у разі зміни кутового коефіцієнту більш ніж на 0,03 (порог визначений методом підбору).

Оскільки бровка та підощва схилу є точками з різкою зміною кута нахилу поверхні — вони фіксуються як межі сегментів. Варто зазначити, що інші характерні елементи рельєфу (зсувні тераси, проміжні уступи) також фіксуються межами сегментів, якщо зміна нахилу на них перевищує встановлений поріг. Із отриманого набору точок залишається обрати ті, що відповідають брівці та підощві. Такий підхід дозволяє мінімізувати суб'єктивність, що притаманна звичайній візуальній оцінці, при ручному визначенні елементів схилу.

Після визначення елементів схилу було розраховано морфометричні показники, що характеризують берегову зону, а саме: апроксимований ухил дна до глибини –5 м, –10 м та –15 м, довжина, висота, ухил (мінімальний, максимальний, апроксимований) зсувного схилу, ширина та апроксимований ухил пляжу.

Для встановлення зв'язків між морфометричними показниками був виконаний кореляційний аналіз. Для кластеризації ділянок узбережжя було застосовано метод К-середніх.

З метою виявлення характеру просторової мінливості морфометричних параметрів та визначення регіональних тенденцій їхньої зміни вздовж досліджуваного узбережжя проведено графоаналітичне моделювання. Побудова ліній просторових трендів здійснювалася методом зважених найменших квадратів (Distance Weighted Least Squares — DWLS). Вибір даного непараметричного методу апроксимації обумовлений його здатністю до адаптивного згладжування даних, що дозволяє нівелювати вплив локальних морфологічних аномалій та чітко візуалізувати генералізовані геоморфологічні закономірності на значних дистанціях. Параметр жорсткості (Stiffness) при побудові було встановлено на рівні 0,25, що забезпечило оптимальний баланс між детальністю відображення реального рельєфу та виділенням цілісної структури берегової зони.

Обробка, аналіз та візуалізація отриманих даних була виконана з використанням програмних пакетів Microsoft Office Excel, ArcGIS та STATISTICA.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Результатом першого етапу дослідження стала комплексна цифрова модель рельєфу (ЦМР) берегової зони з роздільною здатністю 30 м в системі координат WGS 1984 UTM Zone 36N, що включає субаеральну та субаквальну частини узбережжя від с. Санжійка Одеської області до с. Рибаківка Миколаївської області з загальною протяжністю узбережжя до 90 км. Для 109 перпендикулярних до берега перетинів довжиною 9000 м кожний, що побудовані на відстані 500 м один від одного, отримано профілі рельєфу. Варто зазначити, що сформована вибірка профілів не включає ділянки акумулятивних форм рельєфу та гирлові зони лиманів з причин, що вже описані вище.

На другому етапі дослідження визначено морфометричні параметри схилу (апроксимований ухил дна до глибини -5 м, -10 м та -15 м, довжина, висота, ухил (мінімальний, максимальний, апроксимований) зсувного схилу, ширина та апроксимований ухил пляжу) за матрицею даних обсягом 32 000 точок для 109 профілів рельєфу.

Первинний аналіз морфометричних показників виявив високу дискретність будови берегової зони. Відсутність чітких трендів може свідчити про те, що сучасний вигляд схилів формується під впливом локальних факторів (ерозійне розчленування (наявності ярів, балок та ерозійних врізів), антропогенне втручання, стадії розвитку зсувних схилів), які перекривають регіональні закономірності будови узбережжя.

Враховуючи високу дискретність морфометричних показників, для подальшої типізації берегів було застосовано метод k -середніх (k -means). Первинна ітерація кластерного аналізу дозволила чітко локалізувати специфічну групу профілів, що характеризуються мінімальною висотою уступу (середнє значення — 28,3 м) та найменшим кутом нахилу схилу (середнє значення — 6°). Дана група розповсюджена дискретно вздовж усього узбережжя на локальних ділянках протяжністю до 2 км (від 1 до 4 профілів підряд). Візуальна верифікація підтвердила, що ці профілі просторово збігаються з ерозійними врізами.

З метою підвищення точності аналізу та виявлення регіональних закономірностей подальше дослідження морфометричної диференціації та типізації проводилося на основі редукованої бази даних, з якої було виключено профілі ерозійно-розчленованих ділянок узбережжя.

Наступним кроком дослідження став аналіз кореляційних зв'язків між морфометричними показниками. Враховуючи кількість профілів ($N=65$), статистично значущими при 95% довірчому інтервалі ($p<0,05$) для функції крос-кореляції вважаються коефіцієнти кореляції $|r| > 0,244$ (ймовірність того, що такий зв'язок виник випадково, менша ніж 5%).

Серед розрахованої матриці кореляцій цілком закономірними та морфологічно очевидними виявилися зв'язки між наступними параметрами, що відображають стандартну кореляцію геометричних параметрів узбережжя:

Показники	Ухил дна (-5 м)	Ухил дна (-10 м)	Ухил дна (-15 м)	Довжина схилу	Висота схилу	Ухил схилу (мін.)	Ухил схилу (макс.)	Ухил схилу (апр.)	Абс. відмітка осн. схилу	Ширина пляжу	Ухил пляжу
Ухил дна (-5 м)	1,00	0,38	0,43	0,09	0,11	-0,15	0,11	-0,11	0,07	0,20	-0,12
Ухил дна (-10 м)	0,38	1,00	0,93	0,36	0,60	-0,27	0,27	-0,12	0,25	0,43	-0,16
Ухил дна (-15 м)	0,43	0,93	1,00	0,36	0,57	-0,24	0,19	-0,12	0,17	0,41	-0,23
Довжина схилу	0,09	0,36	0,36	1,00	0,65	-0,61	-0,39	-0,81	0,07	0,09	-0,03
Висота схилу	0,11	0,60	0,57	0,65	1,00	-0,31	0,12	-0,23	0,07	0,20	-0,04
Ухил схилу (мін.)	-0,15	-0,27	-0,24	-0,61	-0,31	1,00	0,23	0,74	-0,02	0,01	-0,05
Ухил схилу (макс.)	0,11	0,27	0,19	-0,39	0,12	0,23	1,00	0,62	-0,03	-0,03	0,08
Ухил схилу (апр.)	-0,11	-0,12	-0,12	-0,81	-0,23	0,74	0,62	1,00	-0,02	-0,03	0,00
Абс. відмітка осн. схилу	0,07	0,25	0,17	0,07	0,07	-0,02	-0,03	-0,02	1,00	0,44	0,36
Ширина пляжу	0,20	0,43	0,41	0,09	0,20	0,01	-0,03	-0,03	0,44	1,00	-0,42
Ухил пляжу	-0,12	-0,16	-0,23	-0,03	-0,04	-0,05	0,08	0,00	0,36	-0,42	1,00

Рис. 2. Матриця коефіцієнтів кореляції морфометричних показників берегової зони

- Довжина схилу та його ухил ($r = -0,81$);
- Довжина схилу та висота схилу ($r = 0,65$);
- Абсолютна відмітка основи схилу та ширина пляжу ($r = 0,44$);
- Ширина пляжу та його ухил ($r = -0,42$).

Разом з тим, було виявлено низку менш очевидних зв'язків, які, проте, характеризуються досить високими показниками кореляції, що вказує на їхню вагомість у загальній морфодинамічній системі:

- Висота схилу та ухил дна до відмітки -10 м ($r = 0,60$);
- Висота схилу та ухил дна до відмітки -15 м ($r = 0,57$).

Натомість зв'язку між висотою зсувного схилу та ухилом дна до відмітки -5 м не виявлено, що, імовірно, пов'язано з тим, що ця зона знаходиться під інтенсивним прибіжним впливом.

Виявлений взаємозв'язок між морфометричними параметрами субаеральної та субаквальної частин берегової зони свідчить на користь того, що вони є єдиною морфодинамічною системою, що підтверджує необхідність комплексного розгляду та аналізу берегової зони як цілісного об'єкта.

З метою виявлення регіональних геоморфологічних закономірностей було виконано апроксимацію отриманих даних методом зважених найменших квадратів (DWLS). Даний підхід дозволив трансформувати точкові виміри в неперервні лінії просторових трендів, що відображають динаміку зміни параметрів субаеральної та субаквальної частин берегової зони вздовж узбережжя (рис. 3).

Висота прибережного схилу зростає від с. Санжійка, а після Куяльницько-Хаджибейського пересипу повільно зменшується. Аналогічний тренд можна спостерігати і для довжини схилу. Ухил схилу має найменші показники від мису Великий Фонтан до Великого Аджалицького лиману, починаючи від Малого Аджалицького лиману ухил починає стрімко зростати.

Ухил підводного схилу до ізобат -10 та -15 м демонструє тренд, подібний до зміни висоти прибережного схилу, проте його поступове зменшення фіксується вже від мису Великий Фонтан. Разом з тим, характер зміни ухилу дна до ізобати -5 м суттєво відрізняється в східній частині досліджуваної території:

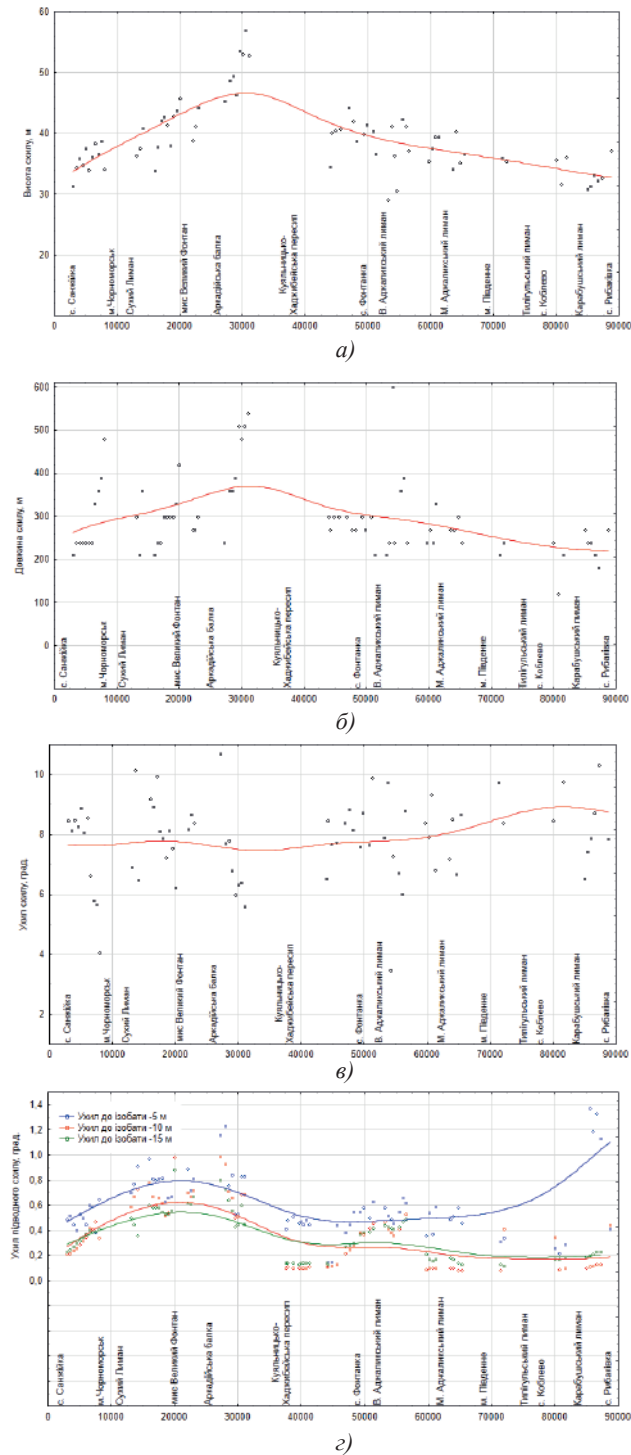


Рис. 3. Зміна морфометричних показників (а — висота схилу; б — довжина схилу; в — апроксимований ухил схилу; г — апроксимований ухил підводного схилу) по профілям вздовж узбережжя (за виключенням ерозійних врізів), метод зважених найменших квадратів (DWLS, Stiffness 0,25)

починаючи від лиману Малий Аджалицький, спостерігається його різке збільшення. За цією особливістю просторова динаміка ухилу дна до глибини –5 м виявляє схожість із трендом зміни ухилу зсувного схилу.

Для типізації ділянок берегової зони на основі всього комплексу отриманих даних було проведено багатовимірний статистичний аналіз. Найбільш релевантні результати групування об'єктів отримано за допомогою методу К-середніх (K-means clustering).

Кластеризація параметрів схилу (висота, довжина, ухил) на чотири кластери показала чітку залежність морфометричних показників від геологічних умов та наявності берегозахисних споруд (табл. 1, рис. 4, рис. 5).

Перший та другий кластери об'єднують ділянки, де меотичні глини переважно не виходять на денну поверхню (Cherkez et al., 2022). Для першого кластеру характерні найбільші з усіх кластерів показники ухилу ($\alpha=8,8^\circ$), що пояснюється переважанням лесовидних суглинків у будові схилу. Другий кластер, маючи схожу геологічну будову, демонструє менший кут нахилу ($\alpha=6,0^\circ$) та більшу довжину схилу (375 м), що є результатом техногенного втручання та реалізації берегозахисних заходів.

Таблиця 1

Кластеризація параметрів схилу на чотири кластери

№ кла-стеру	Параметри схилу	Інженерно-геологічні умови	Розташування
1	$h=34$ м $L=227$ м $\alpha=8,8^\circ$	Лесовидні суглинки, червоно-бурі глини, в нижній частині схилу понтинні вапняки.	с. Санжійка – м. Чорноморськ, м. Південне – с. Рибаківка
2	$h=38$ м $L=375$ м $\alpha=6,0^\circ$	Лесовидні суглинки, червоно-бурі глини, в нижній частині схилу понтинні вапняки. Покрівля меотичних глин виходить на поверхню, або близько до неї. Присутність берегозахисних споруд.	м. Чорноморськ, с. Чорноморське
3	$h=41$ м $L=280$ м $\alpha=8,4^\circ$	Лесовидні суглинки потужністю до 20 м, червоно-бурі глини, понтинні вапняки, меотичні вапняки, в нижній частині схилу меотичні глини.	м. Одеса (Совіньон – Малий Фонтан), м. Одеса (Крижанівка) –В. Аджалицький лиман
4	$h=51$ м $L=446$ м $\alpha=6,6^\circ$	Лесовидні суглинки потужністю до 20 м, червоно-бурі глини, понтинні вапняки, меотичні вапняки, в нижній частині схилу меотичні глини. Повсюдна присутність берегозахисних та протизсувних споруд.	м. Одеса (Аркадія – парк Т. Шевченка)

Третій та четвертий кластери відповідають ділянкам, де меотичні глини залягають переважно вище рівня моря і складають нижню частину схилу, тут при загальному збільшенні висоти схилу (41–51 м) спостерігається зменшення його крутизни. Для четвертого кластеру характерні максимальні значення висоти (51 м) та довжини схилу (446 м) при меншому ухилі. Це, як у випадку із другим кластером, зумовлено повсюдним поширенням берегозахисних та протизсувних споруд.

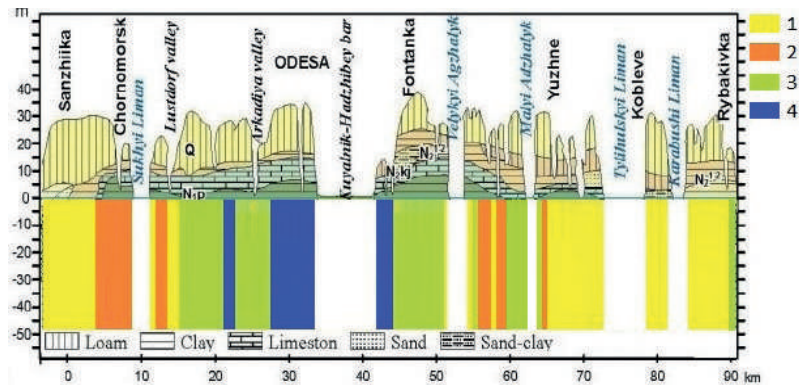


Рис. 4. Кластеризація параметрів схилу на чотири кластери

Важливо відмітити, що просторовий розподіл кластерів з меншим техногенним навантаженням (кластер 1 та кластер 3) вздовж берегової лінії виявляє чітку зональність. Спостерігається закономірна зміна геодинамічного режиму від першого кластеру до третього з подальшим поверненням до першого. Така циклічність пов'язана з регіональною геологічною будовою території, зокрема з наявністю антиклінальної складки, що зумовлює зміну літологічного розрізу, а також висоти схилу. У цій структурі ділянки, віднесені до третього та четвертого кластеру, відповідають замку антиклінальної складки, а ділянки першого та другого кластеру просторово приурочені до крил складки.

Для оцінки якості проведеної кластеризації та ступеня просторової однорідності виділених груп берегових профілів було розраховано внутрішньо-кластерний коефіцієнт варіації. Аналіз показав високу статистичну стійкість сформованої моделі. Максимальне значення коефіцієнта варіації за всіма розглянутими морфометричними показниками не перевищило 25% (сукупність вважається однорідною, а розраховані для неї середні величини — репрезентативними, якщо даний показник не перевищує порогове значення у 33%).

Таким чином, результати кластерного аналізу підтверджують першочерговість геологічної будови як фундаментального фактору, що формує морфологічний вигляд схилу та визначає його просторову зональність. Разом з тим, проведена типізація чітко вказує на високу значимість берегозахисних та протизсувних заходів.

Кластеризація параметрів субаквальної частини берегової зони (ухил дна до ізобат -5 м та -10 м) на три кластери (табл. 2, рис. 5) показала, що їх просторовий розподіл також демонструє певну циклічність: від першого кластеру (с. Санжійка – м. Чорноморськ) до другого (м. Чорноморськ – м. Одеса) з подальшим поверненням до першого кластеру на схід від Одеської затоки. Для першого кластеру характерні найбільш пологі профілі підводного схилу, другий кластер охоплює центральну частину досліджуваного району, де ухил дна суттєво зростає.

Таблиця 2

**Кластеризація параметрів субаквальної частини
берегової зони на три кластери**

№ кла- стеру	Параметри субаквальної частини берегової зони	Розташування
1	$\alpha_5=0,45^\circ$ $\alpha_{10}=0,26^\circ$	с. Санжійка – м. Чорноморськ, Куяльницький лиман – с. Морське (Миколаївська область)
2	$\alpha_5=0,86^\circ$ $\alpha_{10}=0,70^\circ$	м. Чорноморськ – м. Одеса (парк Т. Шевченка)
3	$\alpha_5=1,4^\circ$ $\alpha_{10}=0,11^\circ$	с. Морське – с. Рибаківка (Миколаївська область)

Окрему увагу привертає специфічна порівняно невелика група профілів, виділена у третій кластер (район с. Морське – с. Рибаківка). Ця ділянка характеризується аномальним співвідношенням параметрів: найбільший ухил дна до ізобати -5 м ($\alpha_5=1,4$) при одночасно найменшому ухилі до ізобати -10 м ($\alpha_{10}=0,11^\circ$).

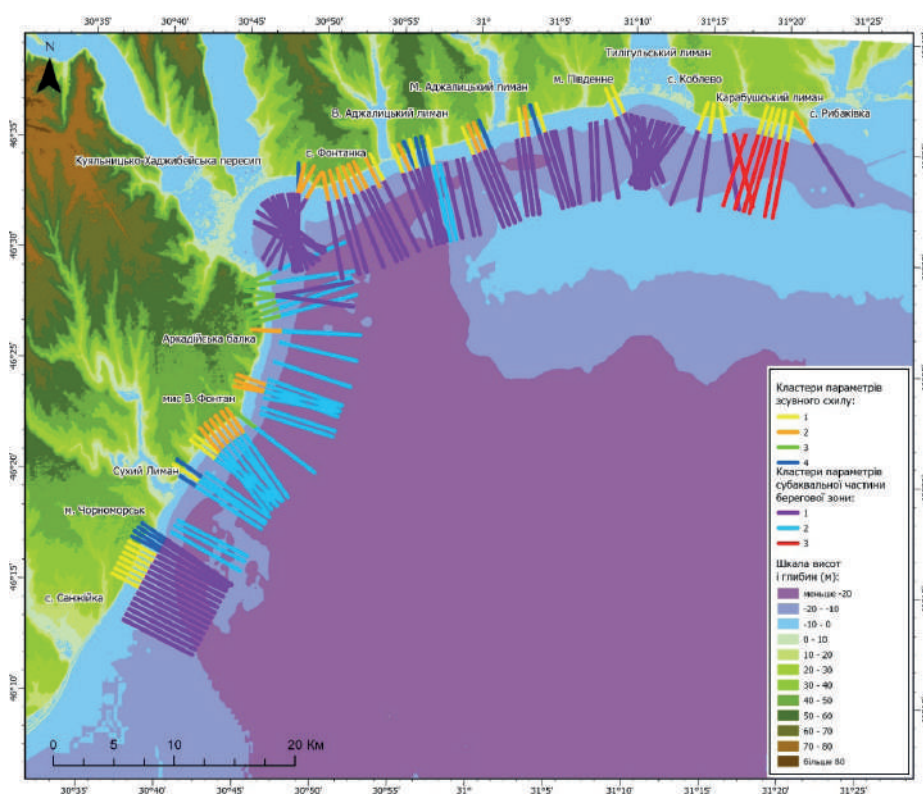


Рис. 5. Кластеризація параметрів субаквальної частини берегової зони
на три кластери та параметрів зсувного схилу на чотири кластери

Варто відмітити, що для одного параметру у межах кластеру № 1 зафіксовано значення коефіцієнта варіації, що перевищує 33%, але подальше збільшення кількості кластерів призводить лише до поділу вже існуючих груп на дрібні сегменти (по декілька профілів поспіль). Збереження ж поточної структури дозволяє уникнути надмірної фрагментації та забезпечує виділення цілісних ділянок узбережжя, що є найбільш репрезентативним для регіонального аналізу.

Таким чином, просторова локалізація кластерів як субаеральної, так і субаквальної частин узбережжя виявляє чітку зональність та закономірну циклічність вздовж берегової лінії.

ВИСНОВКИ

У межах дослідження для оцінки морфометричних параметрів берегової зони північно-західного Причорномор'я протяжністю близько 90 км було сформовано цифрову модель рельєфу, яка інтегрує субаеральну та субаквальну частини. Для 109 поперечних профілів рельєфу було ідентифіковано основні структурні елементи рельєфу та розраховано ключові морфометричні параметри схилу.

Для встановлення закономірностей змін морфометричних параметрів берегової зони було проведено кореляційний аналіз, який підтвердив наявність зв'язку між параметрами надводної та підводної частин. Зокрема, виявлено статистично значущі кореляційні залежності між висотою зсувного схилу та ухилом дна до ізобат –10 м і –15 м. Крім того, встановлено низку інших зв'язків між морфометричними показниками зсувного схилу.

З метою виявлення просторових геоморфологічних закономірностей було виконано апроксимацію отриманих даних методом зважених найменших квадратів. Визначено, що висота та довжина зсувного схилу зростають від с. Санжійка, а після Куяльницько-Хаджибейського пересипу повільно зменшуються. Ухил підводного схилу до ізобат –10 та –15 м демонструє тренд, подібний до зміни висоти та довжини прибережного схилу, проте його поступове зменшення фіксується вже від мису Великий Фонтан. Ухил зсувного схилу має найменші показники від мису Великий Фонтан до Великого Аджалицького лиману, починаючи від Малого Аджалицького лиману ухил починає стрімко зростати.

Для просторового районування території було застосовано кластерний аналіз, який забезпечив виділення чотирьох стійких геоморфологічних типів для надводної частини та трьох типів для підводного схилу. Просторова локалізація кластерів надводної та підводної частини узбережжя виявляє чітку зональність та закономірну циклічність вздовж берегової лінії.

Отримані результати підтверджують, що фундаментальним регіональним фактором, який формує морфометричний вигляд схилу та визначає його просторову зміну, є геологічна будова. Водночас, специфіка окремих виділених груп для зсувного схилу чітко вказує на високу значимість техногенного втручання: берегозахисних та протизсувних заходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

Оползни северо-западного побережья Чёрного моря, их изучение и прогноз / И. П. Зелинский и др. Киев : Наукова думка. 1993, 227 с.

Шуйский Ю. Д., Орган Л. В. Основные закономерности развития вдоль берегового потока наносов в береговой зоне Черного моря. *Austria-science*. 2017. № 6. С. 4–8.

Coastline change assessment using very high resolution satellite images: case study of the Lebedivka village area (Ukraine) / E. A. Cherkez et al. *Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment* : XVI International scientific conference (November 2022). European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Vol. 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580232>

Long-term changes of the shoreline dynamics in the Ukrainian North-Western Black Sea (NWBS) in 1980–2020 / V. I. Medinets et al. *Conference Proceedings, 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (November 2022). European Association of Geoscientists & Engineers, 2022. Vol. 2022. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580226>

REFERENCES

Zelinsky, I. P., Korzhenevsky, B. A., Cherkez, E. A., Shatokhina, L. N., Ibragimzade, D. D., Tsokalo, N. S. (1993). *Opolzni severo-zapadnogo poberezhya Chyornogo morya, ih izuchenie i prognoz* [Landslides of the northwestern Black Sea coast: their study and forecast] (227 p.). Kyiv: Naukova dumka. [in Russian].

Shuisky, Yu. D., & Organ, L. V. (2017). Osnovnye zakonomernosti razvitiya vdol beregovogo potoka nanosov v beregovoy zone Chernogo morya [Main regularities of the development of the longshore sediment transport in the Black Sea coastal zone]. *Austria-Science*, (6), 4–8. [in Russian].

Cherkez, E. A., Medinets, V. I., Shatalin, S. M., Kuzmenko, A. Y., Kuzmenko, O. Y., Kozlova, T. V., Medinets, S. V., & Soltys, I. E. (2022). Coastline change assessment using very high resolution satellite images: case study of the Lebedivka village area (Ukraine). *Monitoring of geological processes and ecological condition of the environment*: XVI International Scientific Conference, November 2022 (Vol. 2022, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580232>

Medinets, V. I., Cherkez, E. A., Pavlik, T. V., Shatalin, S. M., Kozlova, T. V., Kuzmenko, A. Y., Kuzmenko, O. Y., Medinets, S. V., & Soltys, I. E. (2022). Long-term changes of the shoreline dynamics in the Ukrainian North-Western Black Sea (NWBS) in 1980–2020. *Conference Proceedings, 16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* (Vol. 2022, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580226>

A. Ye. Kuzmenko¹,

S. M. Shatalin²,

Odesa I. I. Mechnikov National University,

Department of Marine Geology, Hydrogeology, Engineering Geology and
Paleontology,

2 Shampanskyi Ln, Odesa, 65058, Ukraine;

¹annzno18@gmail.com; <https://orcid.org/0009-0002-3240-1362>

²shatalin@onu.edu.ua; <https://orcid.org/0000-0002-1596-0800>

INTERRELATIONSHIPS OF MORPHOMETRIC PARAMETERS IN THE SUBMARINE AND SUBAERIAL PARTS OF THE NORTH-WESTERN BLACK SEA SLOPE

Abstract

Problem Statement and Purpose. The coastal zone of the North-Western Black Sea region is characterized by complex engineering-geological conditions, which drive a high intensity of hazardous processes, such as landslides, rockfalls, and abrasions. Understanding the morphological structure of these areas is critical for assessing coastal stability and predicting the development of hazardous processes. The objective of this study is to establish the spatial patterns of the coastal zone's morphological structure in the North-Western Black Sea region,

characterizing the “subaerial slope – submarine slope” system, through a multiparametric statistical analysis of morphometric parameters.

Data and Methods. The research is based on a digital elevation model (DEM) generated by integrating SRTM data for the subaerial part with echo-sounding measurements and bathymetric observation data for the submarine part. Using a piecewise linear approximation algorithm for transverse relief profiles, the primary relief elements were identified, and their morphometric parameters were calculated. To establish the interrelationships among them and determine the nature of their spatial variability, the study utilized correlation analysis, K-means clustering, and the construction of spatial trend lines using the weighted least squares method.

Results. The correlation analysis of the morphometric parameters revealed a series of associations between the geometric parameters of the coastline, including those between the subaerial and subaqueous parts of the coastal zone. This confirms the structural integrity of the “subaerial slope – submarine slope” system. Using the weighted least squares method, the dynamic changes in the parameters of both the subaerial and subaqueous parts of the coastal zone along the shoreline were determined. It was identified that the height and length of the landslide slope increase starting from the village of Sanzhiika and, upon passing the Kuialnyk-Khadzhybei bay-bar, gradually decrease. The gradient of the submarine slope up to the –10 m and –15 m isobaths demonstrates a trend similar to the variations in the height and length of the coastal slope; however, its progressive decrease is recorded earlier, starting from Cape Velykyi Fontan. The clustering of slope parameters demonstrated that the spatial localization of clusters in both the subaerial and subaqueous sections of the coast exhibits distinct zonality and a consistent cyclicity along the shoreline. This cyclicity is associated with the regional geological structure of the territory, specifically the presence of an anticlinal fold, which drives changes in the lithological cross-section as well as the slope height. Furthermore, the conducted typification clearly underscores the high significance of coastal protection and anti-landslide measures as an anthropogenic factor in relief formation.

Keywords: coastal geomorphology, Odesa region, subaqueous part of the coast, subaerial part of the coast.

Отримано редакцією / Received 12.04.2026

Прорецензовано / Reviewed 23.05.2026

Схвалено до друку / Accepted 24.05.2026

Опубліковано / Published 10.08.2026

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів. Спонсори не брали участі в розробленні дослідження; у зборі, аналізі чи інтерпретації даних; у написанні рукопису; в рішенні про публікацію результатів. При написанні статті автори не використовували ШІ.