

УДК 551

[https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.2\(47\).344777](https://doi.org/10.18524/2303-9914.2026.2(47).344777)

А. Є. Кузьменко, аспірантка

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

С. М. Шаталін, старший викладач

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

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
кафедра морської геології, гідрогеології, інженерної геології та палеонтології
Шампанський пров., 2, м. Одеса, 65015, Україна

СТІЙКІСТЬ ПРИБЕРЕЖНИХ СХИЛІВ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОГО ПРИЧОРНОМОР'Я: ПОРІВНЯННЯ РОЗРАХУНКОВОГО МЕТОДУ ТА МЕТОДУ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ДАНИХ ДЗЗ

У роботі представлені результати співставлення просторової оцінки стійкості схилів північно-західного Причорномор'я за даними ДЗЗ із опублікованими Зелінським та ін. (1993) результатами розрахункового методу. Проаналізовано особливості розподілу показників стійкості схилів, отриманих з використанням даних ДЗЗ. Показано можливості застосування методів, що базуються на даних ДЗЗ, для оцінки стійкості прибережних схилів у регіональних масштабах.

Ключові слова: стійкість схилу, північно-західне Причорномор'я, дистанційне зондування Землі, метод круглоциліндричних поверхонь ковзання.

ВСТУП

Північно-західне узбережжя Чорного моря є зоною активного розвитку небезпечних екзогенних геодинамічних процесів, серед яких одними з найпоширеніших є зсуви та обвали. Масштабність і динаміка цих процесів створюють реальну загрозу для прибережної інфраструктури, особливо в умовах зростаючого антропогенного навантаження.

Не дивлячись на те, що дослідженням схилових процесів в північно-західному Причорномор'ї приділено достатньо уваги (Зелінський та ін., 1993; Cherkez et al., 2021), останнім часом відбувається скорочення обсягів інструментальних досліджень та наземних спостережень в регіоні. За таких умов дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) стають все більш актуальним джерелом інформації для оцінки стійкості схилів. Разом із тим, підходи, засновані на використанні даних ДЗЗ, потребують співставлення з класичними розрахунковими методами, які ґрунтуються на безпосередніх вимірюваннях і польових спостереженнях та забезпечують високу достовірність результатів.

У цьому дослідженні зіставлено результати оцінки стійкості схилів північно-західного Причорномор'я, що отримані шляхом побудови факторної моделі,

яка враховує морфометричні параметри рельєфу, щільність рослинного покриття та ступінь вологості поверхні, які розраховані за даними ДЗЗ, із результатами розрахунку коефіцієнтів стійкості схилів методом круглоциліндричних поверхонь ковзання, що враховує властивості порід і будову схилу (Зелінський та ін., 1993).

Ці два підходи суттєво відрізняються за своєю методологією. Розрахунковий метод ґрунтується на детальному вивченні конфігурації схилу та властивостей ґрунтів, тобто є аналітичним і диференційованим методом. Оцінка за супутниковими даними — інтегративна, узагальнююча. Саме тому особливий інтерес становить порівняння результатів, отриманих цими методами, та оцінка ступеня їхньої відповідності.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю перевірки надійності підходу, що базується на даних ДЗЗ, та відповідності його результатів реальним умовам, що дозволить оцінити можливості практичного використання запропонованого методу у регіональних дослідженнях.

Метою статті є порівняння розрахункового методу та методу, що базується на даних ДЗЗ, для оцінки стійкості прибережних схилів північно-західного Причорномор'я.

Для досягнення поставленої цілі необхідно вирішити наступні задачі:

- виконати оцінку стійкості схилів за допомогою факторної моделі, що базується на даних ДЗЗ;
- проаналізувати просторовий розподіл отриманих показників стійкості прибережних схилів за результатами з факторної моделі;
- порівняти результати, що отримані за допомогою факторної моделі, з результатами оцінки методом круглоциліндричних поверхонь ковзання;
- оцінити переваги та обмеження використання дистанційних та розрахункових методів у дослідженні стійкості схилів.

Об'єкт дослідження — прибережні схили північно-західного узбережжя Чорного моря.

Предмет дослідження — стійкість прибережних схилів та методи її оцінки.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У процесі дослідження для побудови факторної моделі стійкості схилів використовувались знімки супутникового комплексу Sentinel-2 (із відкритого джерела Copernicus Browser) з просторовою роздільною здатністю 10 м та цифрова модель рельєфу SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільною здатністю 30 м. Результати розрахунків коефіцієнтів стійкості схилу методом круглоциліндричних поверхонь ковзання взято з опублікованого дослідження зсувів північно-західного узбережжя Чорного моря Зелінського та ін. (1993).

Обробку та аналіз даних здійснено із залученням програмного забезпечення Statistica, Microsoft Office Excel та ArcGIS.

Побудова факторної моделі стійкості схилів виконувалась за методикою Aslam et al. (2022), що ґрунтується на використанні вагових коефіцієнтів і дозволяє оцінити сукупний вплив кількох природних факторів, значущих у формуванні зсувів.

Для оцінки стійкості прибережних схилів північно-західного узбережжя Чорного моря розроблено просторову модель, що враховує сукупний вплив семи факторів: морфометричних параметрів рельєфу (ухил, довжина схилу, кривизна загальна, профільна та планова) та індексів NDVI (характеризує рослинний покрив) і NDWI (відображає ступінь вологості поверхні), які розраховано за загальноприйнятими методиками.

Вибір зазначених факторів зумовлений їхнім безпосереднім впливом на формування та інтенсивність зсувних процесів. Ухил та довжина схилу є базовими морфометричними характеристиками, які створюють умови для виникнення схилових процесів: чим більші ці показники, тим вища ймовірність втрати стійкості. Інші фактори не є обов'язковою умовою виникнення схилових процесів, проте вони суттєво впливають на їх перебіг та інтенсивність. Кривизна рельєфу формує геометрію схилу: опуклі ділянки більш нестійкі, тоді як увігнуті мають відносно вищу стійкість. Профільна кривизна впливає на прискорення або уповільнення потоків, що визначає інтенсивність ерозії, тоді як планова кривизна відображає конвергенцію чи дивергенцію стоку, змінюючи умови накопичення вологи. Характер рослинного покриву є важливою характеристикою, оскільки густа рослинність закріплює схили та зменшує швидкість їх руйнування, а слабкий рослинний покрив може свідчити про постійне руйнування схилу або надмірну крутизну. Ступінь зволоження впливає на вагу гірських порід, які складають схил, та їхні міцнісні властивості, що особливо суттєво для лесових порід, поширених у регіоні.

Оскільки фактори мають різні одиниці виміру, значення кожного з них було переведено у п'ятибальну шкалу, що дозволяє уніфікувати різномірні показники. Для цього застосовано метод природних розривів (natural breaks), який групує дані так, щоб мінімізувати варіацію всередині класів і максимізувати відмінності між ними.

Враховуючи, що фактори мають різну вагу у кінцевому результаті, для них використано вагові коефіцієнти, визначені в дослідженні Aslam et al. (2022) методом аналітичної ієрархії (Analytical Hierarchy Process): ухил – 0,26, NDWI – 0,21, довжина схилу – 0,16, NDVI – 0,14, планова кривизна – 0,12, загальна кривизна – 0,09, профільна кривизна – 0,02. Розрахунок результуючого показника, що характеризує стійкість до зсуву, здійснено шляхом підсумовування значень усіх факторів, помножених на їхні вагові коефіцієнти. Для зручності інтерпретації отримані результати переведено у стобальну шкалу: значення, менші за 60, можна вважати ознакою найбільш стійких схилів або ділянок без схилів; значення від 60 до 80 вказують на схили зі схильністю до розвитку зсувних процесів; значення понад 80 спостерігаються лише на окремих локальних ділянках і можуть свідчити про найбільш зсуво- та обвалонебезпечні ділянки.

Отримані за допомогою факторної моделі результати було зіставлено з коефіцієнтами стійкості схилів, що розраховані за допомогою методу круглоциліндричних поверхонь ковзання, з опублікованого дослідження Зелінського та ін. (1993).

Метод круглоциліндричних поверхонь ковзання (модифікація Городецького) застосовується для визначення коефіцієнту стійкості схилів з складною геологічною будовою та дозволяє оцінити стійкість з наступними припущеннями: поверхня зміщення приймається круглоциліндричною, напружений стан в кожній точці масиву визначається тільки вагою гірських порід, що залягають вище, міцність порід визначається законом Кулона. Для визначення коефіцієнта стійкості методом круглоциліндричних поверхонь ковзання використовують такі основні вхідні дані: фізико-механічні властивості порід (питому вагу, коефіцієнт зчеплення, кут внутрішнього тертя), геометрію схилу та його стратиграфічну будову. Використовуючи ці параметри підбирається така поверхня ковзання (дуга кола з певним радіусом та положенням центру), для якої розрахований коефіцієнт стійкості буде найменшим. Отримане мінімальне значення коефіцієнта стійкості приймається за коефіцієнт стійкості схилу, а ймовірне зсувне зміщення відбудеться саме вздовж цієї визначеної круглоциліндричної поверхні.

Для порівняння результатів, отриманих за допомогою описаних методів, обрано 9 контрольних точок узбережжя, де Зелінським та ін. (1993) за типовими інженерно-геологічними розрізами розраховано коефіцієнти стійкості. Для цих самих контрольних точок в межах даного дослідження були виділені ділянки узбережжя, локалізовані за територіальними орієнтирами. Контур схилу визначався за ізолініями ухилу з пороговим значенням понад $2,3^\circ$. Для кожної ділянки було обчислено середнє значення стійкості до зсувів за факторною моделлю, що дало можливість безпосередньо порівняти отримані результати з розрахунками Зелінського та ін. (1993).

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

На першому етапі дослідження було побудовано факторну модель стійкості до зсувів, що дозволяє оцінити ризики виникнення зсувів та обвалів на схилах досліджуваної території, що охоплює північно-західне узбережжя Чорного моря загальною протяжністю близько 220 км в Одеській та Миколаївській областях (рис. 1). Модель враховує основні фактори, що визначають стійкість схилів та можуть бути отримані на основі даних ДЗЗ, зокрема ухил поверхні, кривизна, довжина схилу, ступінь вологості та рослинний покрив.

Згідно з факторною моделлю, найбільш зсуво- або обвалонебезпечними є схили в межах населених пунктів Курортне, Санжійка та Чорноморське (рис. 2). Загалом потенційно небезпечні ділянки схилів, що мають показники стійкості більше 60, охоплюють значну частину узбережжя від м. Очаків до с. Лебедівка (за винятком піщаних пересипів). Водночас низькі ризики розви-

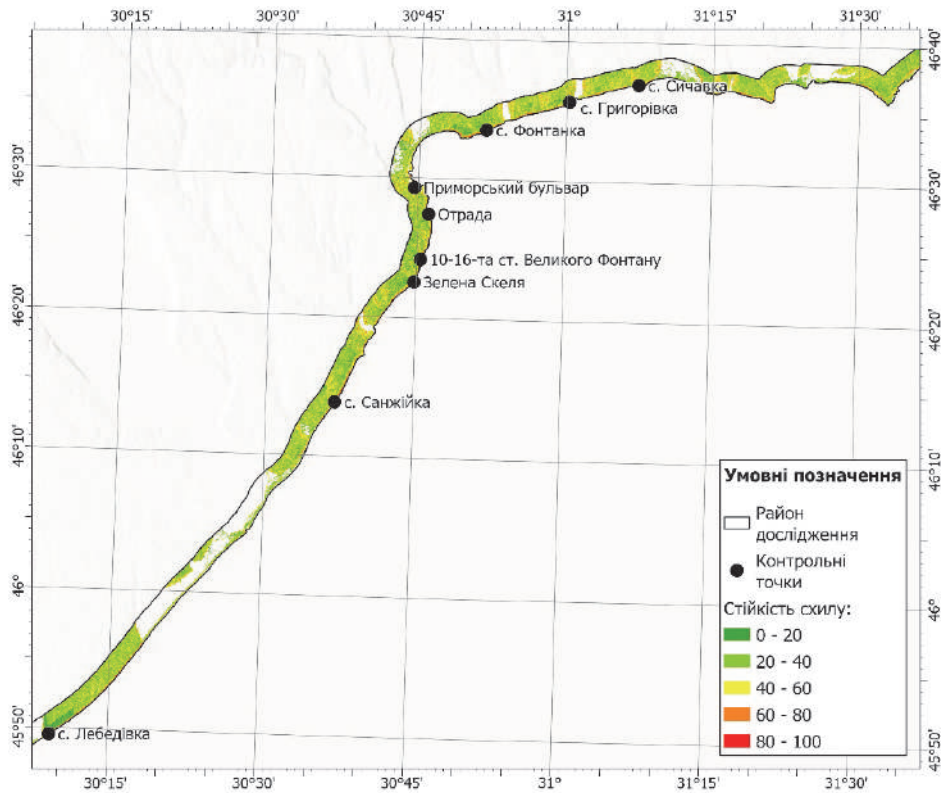


Рис. 1. Оглядова схема факторної моделі (ділянка м. Очаків – с. Лебедівка).

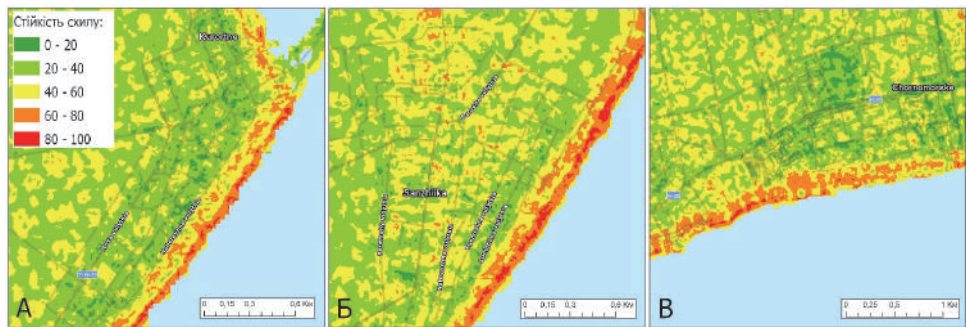


Рис. 2. Схили в межах населених пунктів Курортне (А), Санжійка (Б) та Чорноморське (В).

тку зсувних процесів в районах, де розташовані лимани (Будацький, Дністровський, Тузлівські, Сасик), які відокремлені від моря акумулятивними формами – піщаними пересипами, а також в районі дельти Дунаю, що повністю відповідає уявленням про зсувні та обвальні процеси в досліджуваному регіоні (Medinets V. I. et al., 2022).

Для подальшого співставлення результатів, отриманих різними методами, були визначені дев'ять контрольних точок. Вибір саме цих контрольних точок зумовлений наявністю для них розрахованих Зелінським та ін. (1993) коефіцієнтів стійкості схилів. Для кожної з цих ділянок за однаковою методикою отримано середнє значення стійкості з факторної моделі, що дозволяє зіставити результати просторової оцінки з окремими значеннями коефіцієнтів стійкості, отриманих за типовими для цих ділянок розрізами (табл. 1).

Таблиця 1

Отримані для контрольних точок показники

№	Контрольна точка	Середнє значення ухилу поверхні (градуси)	Середнє значення стійкості (факторна модель)	Коефіцієнт стійкості схилу (Зелінський та ін., 1993)
1	с. Сичавка	7,03	54,3	1,03
2	с. Григорівка	7,38	53,32	1,1
3	с. Фонтанка	8,45	55,95	1,09
4	Приморський бульвар (м. Одеса)	8,66	50,55	1,07
5	Отрада (м. Одеса)	7,72	47,59	1,88
6	10-та – 16-та станція Великого Фонтану (м. Одеса)	8,68	52,7	1,81
7	Зелена Скеля (м. Одеса)	10,51	56,65	0,93
8	с. Санжійка	6,33	55,88	0,81
9	с. Лебедівка	4,51	57,09	0,74

Співставлення розрахованих у межах цього дослідження середніх значень стійкості до зсувів із коефіцієнтами стійкості схилів, розрахованими Зелінським та ін. (1993), показало наявність сильного зворотного зв'язку з коефіцієнтом кореляції $r = -0,77$ (рис. 3). Зворотність кореляційного зв'язку пояснюється протилежністю шкал: у факторній моделі менші значення відповідають відносно стійким схилам, а більші — потенційно зсуво- або обвалонебезпечним, натомість більші значення коефіцієнта стійкості свідчать про високу стійкість схилу. Також було проаналізовано наявність зв'язку між коефіцієнтом стійкості схилів за даними Зелінського та ін. (1993) та ухилом поверхні — фактором, який у межах побудованої факторної моделі отримав найвищий ваговий кое-

фіцієнт (0,26). За результатами кореляційного аналізу статистично значущого зв'язку між величинами не виявлено ($r = 0,32$). Це свідчить про те, що на рівні окремих контрольних точок ухил сам по собі не визначає стійкість схилу, що підкреслює необхідність комплексного підходу, коли оцінка враховує одночасно всі значущі фактори, включені до моделі.

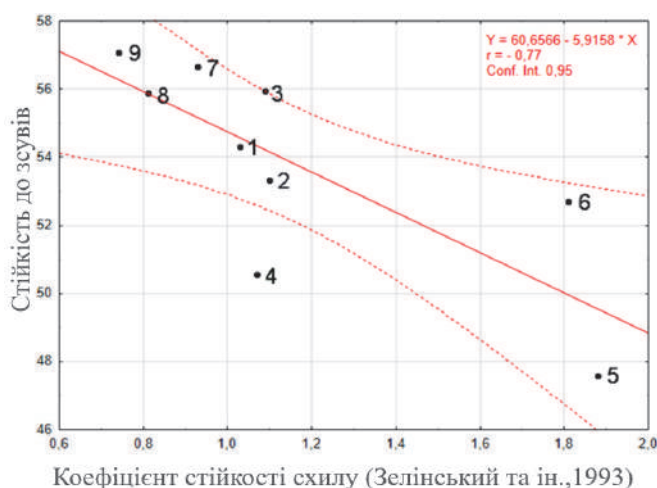


Рис. 3. Залежність між коефіцієнтами стійкості схилів (Зелінський та ін., 1993) та середніми значеннями стійкості до зсувів.

Така взаємозалежність свідчить про прийнятний рівень відповідності результатів побудованої факторної моделі реальним умовам стійкості схилів, незважаючи на обмежену деталізацію супутникових даних. Виявлена кореляція підтверджує ефективність використання факторної моделі на основі даних ДЗЗ для оцінки просторового розподілу ризику зсувів та обвалів для великих територій, дозволяючи визначати відносно небезпечні ділянки та пріоритети для подальших польових досліджень.

Таким чином, хоча тільки розрахункові методи забезпечують точну оцінку стійкості схилів, оскільки ґрунтуються на детальному вивченні конфігурації схилу та фізико-механічних властивостей порід, їх застосування обмежене локальними ділянками та потребує детальної польової інформації. Водночас використання даних дистанційного зондування дозволяє оцінювати просторовий розподіл стійкості схилів на великих територіях і забезпечує можливість виділення найбільш небезпечних ділянок навіть за відсутності польових досліджень.

ВИСНОВКИ

У межах дослідження для оцінки стійкості схилів за даними ДЗЗ розроблено факторну модель, яка інтегрує ключові чинники, що впливають на стійкість схилів і можуть бути отримані з відкритих джерел дистанційних даних. Модель враховує морфометричні характеристики рельєфу, ступінь вологості поверхні та щільність рослинного покриву.

Факторна модель забезпечила просторову оцінку стійкості схилів вздовж північно-західного узбережжя Чорного моря, протяжністю понад 220 км. Найбільш зсуво- та обвалонебезпечними виявились схили в межах населених пунктів Курортне, Санжійка та Чорноморське. Загалом потенційно небезпечні ділянки простягаються вздовж значної частини узбережжя від м. Очаків до с. Лебедівка, що відповідає існуючим уявленням про характер зсувних та обвальних процесів у регіоні.

Для перевірки достовірності отриманих результатів проведено їх співставлення із коефіцієнтами стійкості схилів, що отримані методом круглоциліндричних поверхонь ковзання (Зелінський та ін., 1993). Аналіз показав наявність сильного кореляційного зв'язку, що свідчить про прийнятний рівень відповідності просторової оцінки за даними дистанційного зондування результатам класичного розрахункового методу, незважаючи на різницю методик і деталізацію вихідних даних.

Отримані результати підтверджують, що факторна модель на основі даних ДЗЗ дозволяє виконувати попередню оцінку просторового розподілу ризику зсувів і обвалів в регіональному масштабі. Хоча тільки розрахункові методи можуть забезпечити точну оцінку стійкості схилів, оскільки ґрунтуються на точних і детальних даних про конфігурацію схилу та фізико-механічні властивості порід, але їх застосування обмежене локальними ділянками та потребує детальної польової інформації. В той час як використання даних ДЗЗ дає можливість оцінювати великі території та визначати найбільш небезпечні ділянки навіть за відсутності польових спостережень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Оползни северо-западного побережья Чёрного моря, их изучение и прогноз / И. П. Зелинский, Б. А. Корженевский, Е. А. Черкез, Л. Г. Шатохина, Д. Д. Ибрагимзаде, Н. С. Цокало. Киев : Наукова думка, 1993, 227 с.
- Evaluation of different landslide susceptibility models for a local scale in the Chitral District, Northern Pakistan / B. Aslam, A. Maqsoom, U. Khalil, O. Ghorbanzadeh, T. Blaschke, D. Farooq, R. F. Tufail, S. A. Suhail, P. Ghamisi. *Sensors*. 2022. Vol. 22, iss. 9. Article 3107. <https://doi.org/10.3390/s22093107>
- Landslides at the north-western Black Sea coast (Ukraine) and the engineering & geological effectiveness of landslide prevention works / E. A. Cherkez, T. V. Kozlova, S. N. Shatalin, V. I. Medinets, S. V. Medinets, I. E. Soltys. *Third EAGE Workshop on assessment of landslide hazards and impact on communities 2021 (September 2021)*. European Association of Geoscientists & Engineers, 2021. Vol. 2021. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1015>
- Long-term changes of the shoreline dynamics in the Ukrainian North-Western Black Sea (NWBS) in 1980–2020 / V. I. Medinets, E. A. Cherkez, T. V. Pavlik, S. M. Shatalin, T. V. Kozlova, A. Y. Kuzmenko, O. Y. Kuzmenko, S. V. Medinets, I. E. Soltys. *16th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment : proceedings*. European Association of Geoscientists & Engineers, 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].
- Aslam, B., Maqsoom, A., Khalil, U., Ghorbanzadeh, O., Blaschke, T., Farooq, D., Tufail, R. F., Suhail, S. A., & Ghamisi, P. (2022). Evaluation of different landslide susceptibility models for a local scale in the Chitral District, Northern Pakistan. *Sensors*, 22(9), 3107. <https://doi.org/10.3390/s22093107>
- Cherkez, E. A., Kozlova, T. V., Shatalin, S. N., Medinets, V. I., Medinets, S. V., Soltys, I. E. (2021). Landslides at the north-western Black Sea coast (Ukraine) and the engineering & geological effectiveness of landslide prevention works. *Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and impact on communities 2021 (September 2021)* (Vol. 2021, pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215K1015>
- 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. *16th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment* [Conference proceedings] (pp. 1–5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580226>

Стаття надійшла 22.10.2025 р.

A. Ye. Kuzmenko

S. M. Shatalin

Odesa I. I. Mechnikov National University,
Department of Marine Geology, Hydrogeology, Engineering Geology and Paleontology
2 Shampanskyi Ln, Odesa, 65015, Ukraine

COASTAL SLOPE STABILITY OF THE NORTH-WESTERN BLACK SEA REGION: COMPARISON OF THE CALCULATION-BASED METHOD AND THE REMOTE SENSING-BASED METHOD

Abstract

Problem Statement and Purpose. Landslides and avalanches represent a significant problem in the north-western Black Sea region. Given the decreasing scope of fieldwork in the area, the role of remote sensing (RS) as a tool for regional assessment of slope stability is increasing. However, such approaches require verification against classical calculation methods. The aim of this study is to compare the calculation-based method with the RS-based approach for assessing the stability of coastal slopes in the north-western Black Sea region.

Data & Methods. The study used Sentinel-2 satellite imagery and SRTM digital elevation model (DEM) data to construct a factor-based slope stability model. The model integrates indicators of morphometric terrain characteristics, surface moisture, and vegetation density, allowing their combined influence on slope stability to be assessed. To verify the reliability of the results, they were compared with published slope stability coefficients obtained by Zelinsky et al. (1993) using the circular cylindrical slip surface method.

Results. The factor-based model, constructed using remote sensing data, provided a spatial assessment of slope stability along the north-western Black Sea coast, spanning over 220 km. The slopes within the settlements of Kurortne, Sanzhiika, and Chornomorske were identified as the most landslide- and avalanche-prone. In

general, potentially hazardous areas extend along a significant portion of the coastline from Ochakiv to Lebedivka, consistent with existing understanding of landslide and avalanche processes in the region.

The comparison of slope stability indicators obtained from the factor-based model with the published stability coefficients calculated using the circular cylindrical slip surface method revealed a strong correlation. This indicates an acceptable level of agreement between the spatial assessment based on remote sensing data and the results of the classical calculation method, despite differences in methodology and data resolution. The results confirm that the factor-based model using remote sensing data enables a preliminary evaluation of the spatial distribution of landslide and avalanche risk at the regional scale.

Keywords: slope stability, north-western Black Sea coast, remote sensing, circular cylindrical slip surface method.