

УДК 528.94:625.7(477.87)

Касіянчук Д. В., канд. геол. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4761-5320>Штогрин Л. В., канд. геол. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0001-8381-1236>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

ОБРОБКА ГЕОВИМІРІВ У ЗАДАЧАХ ПЛАНУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ БУДІВНИЦТВА, ЕКСПЛУАТАЦІЇ ДОРІГ У ЗСУВНИХ РАЙОНАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ГІС

Анотація

Вступ. Розвиток транспортної інфраструктури у гірських регіонах України стикається з проблемою активних зсувних процесів, які суттєво впливають на стабільність дорожніх мереж.

Проблематика. Значна частина доріг у Карпатах проходить територіями з підвищеною геологічною небезпекою. При будівництві доріг порушується природна стійкість схилів (підрізка чи насипи), змінюється дренаж, може накопичуватись волога. При цьому просторовий аналіз взаємного розташування зсувів і дорожньої мережі виконується недостатньо, що ускладнює оцінку ризиків.

Мета. Дослідження просторового положення зсувів відносно доріг із використанням ГІС-методів, виділення груп зсувів за вертикальним положенням та оцінка їхнього впливу на дорожню інфраструктуру.

Матеріали й методи. Використано дані цифрової моделі рельєфу (DEM), векторні шари зсувів та автомобільних доріг для території Верховинського та Косівського районів Івано-Франківської області. Для визначення напрямку і характеру небезпеки зсувів виконано просторовий аналіз виконано в середовищі QGIS із розрахунком мінімальної відстані до дороги та різниці абсолютних висот між зсувним тілом і проїзною частиною автомобільної дороги.

Результати. Усього проаналізовано 467 зсувів. Виділено три групи: зсуви нижче дороги (202 випадки), середня відстань до дороги 206,8 м; зсуви на рівні дороги (29 випадків), середня відстань 20,1 м; зсуви вище дороги (236 випадків), середня відстань 169,5 м, середня різниця висот 34,1 м. Найбільш небезпечними є зсуви вище дороги, оскільки вони здатні блокувати транспортні шляхи. Зсуви нижче дороги можуть викликати ерозію схилів і підмиви, що зменшує стійкість схилів, а зсуви на рівні дороги відображають деформації на старих зсувних тілах, що може проявлятися у вигляді тріщин чи просідання дорожнього одягу.

Висновки. ГІС-аналіз зсувів виявив три групи за відносною висотою: найнебезпечніші розташовані вище дороги (50,5 %), нижче дороги формують ерозійні ризики, а на рівні дороги свідчать про нестабільні схили. Для управління інфраструктурою рекомендовано системний моніторинг у ГІС.

Ключові слова: автомобільна дорога, ГІС, зсуви, геовимір, просторові дані.

Вступ

Будівництво та експлуатація автомобільних доріг у гірських регіонах України є стратегічним завданням державної транспортної політики, адже саме вони забезпечують доступність віддалених територій, розвиток туризму та мобільність населення. Водночас складні інженерно-геологічні умови Карпат створюють значні ризики для транспортної інфраструктури. Одним із найпоширеніших та найнебезпечніших процесів є зсуви, які призводять до руйнування ділянок автомобільних доріг, порушення транспортних зв'язків і значних економічних збитків [1].

За останні десятиліття у світі спостерігається тенденція до зростання частоти та інтенсивності зсувних процесів, що пов'язано як із природними чинниками, так і з антропогенними навантаженнями. Дослідження показують, що у гірських районах саме дороги найчастіше стають об'єктами впливу зсувів, оскільки їх будівництво передбачає втручання в геологічне середовище — зрізку схилів,

формування насипів, зміну природного водного режиму. Це робить транспортну інфраструктуру вразливою до активізації схилових процесів [2].

Методи просторового аналізу та геоінформаційні системи (ГІС) відкрили нові можливості для вивчення взаємозв'язків між зсувами та дорожньою мережею. У публікації [3] наголошують, що ймовірнісні моделі, побудовані на основі цифрових моделей рельєфу (DEM), геологічних і гідрологічних карт, дозволяють прогнозувати небезпечні ділянки та розробляти карти зсувної небезпеки. Про важливість комплексного підходу зазначено у [4], де поєднуються просторові дані, статистичні методи та результати польових досліджень.

В умовах кліматичних змін проблема загострюється. Збільшення кількості сильних опадів та інтенсивність ерозійних процесів призводять до активізації зсувів у всьому світі. Водночас зростає транспортне навантаження потребує розвитку дорожньої інфраструктури, що часто супроводжується її розташуванням на схилах із підвищеною геологічною небезпекою. Це створює конфлікт між необхідністю розвитку транспорту та потребою збереження стабільності схилів [5].

Українські Карпати є одним із найбільш зсувонебезпечних регіонів Європи. За даними [6], ключовими факторами розвитку зсувних процесів тут є геологічна будова, зволоженість гірських відкладів, значні перепади висот і фрагментація рельєфу. Попередні дослідження [7] засвідчили ефективність використання ГІС у межах Косівського району, де було виявлено закономірності розподілу зсувів і визначено найбільш небезпечні ділянки доріг.

Попри наявність багатьох досліджень, більшість робіт зосереджується на картуванні зсувонебезпечних територій загалом. Менш вивченою є проблема аналізу вертикального положення зсувів відносно дорожньої мережі. Саме цей аспект має ключове значення для оцінки рівня ризику: зсуви, що формуються вище дороги, можуть призвести до миттєвого перекриття транспортних шляхів, тоді як зсуви нижче дороги сприяють довготривалій ерозійній дестабілізації схилів.

Отже, актуальність дослідження полягає у необхідності застосування ГІС-методів для аналізу просторового та висотного положення зсувів відносно автомобільних доріг. Це дозволить підвищити ефективність моніторингу та знизити ризики для транспортної інфраструктури Карпатського регіону.

Метою роботи є застосування геоінформаційного аналізу для вивчення просторових взаємозв'язків між зсувами та дорогами у Карпатах, зокрема із врахуванням їхнього вертикального положення.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети було використано комплекс геопросторових даних та сучасні інструменти геоінформаційного аналізу.

Вихідні дані

Цифрова модель рельєфу (DEM). У дослідженні застосовано дані SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) з просторовою роздільністю 30 м, які забезпечують достатній рівень деталізації для аналізу оротографії гірської місцевості. DEM дозволяє визначати абсолютні висоти об'єктів, нахили та експозицію схилів, що є ключовим для вивчення зсувних процесів.

Полігони зсувів. Використано офіційні геокадастрові дані, доповнені матеріалами регіонального моніторингу Івано-Франківської області. Полігони описують межі зсувних тіл та дозволяють визначати їх площу, контури і центроїд. Загалом проаналізовано 467 зсувів різної площі та генезису.

Дорожня мережа. Використано векторний шар автомобільних доріг, отриманий з відкритих картографічних ресурсів та уточнений за допомогою даних Державного земельного кадастру. Це дозволило забезпечити високу точність просторового співставлення зсувів і транспортної інфраструктури.

Інструментарій

Аналіз здійснено у середовищі QGIS 3.28, яке є відкритим програмним продуктом (GNU GPL 2). QGIS дозволяє виконувати багатокрокові геоінформаційні операції, інтегрувати растрові та векторні дані та застосовувати інструменти просторової статистики.

Основні модулі та інструменти, що застосовувалися:

Sample raster values — визначення висотних значень за DEM у заданих точках;

Distance to nearest hub — розрахунок мінімальної відстані від центроїда зсуву до найближчої дороги;

Field calculator — виконання обчислень і класифікацій за заданими критеріями.

Методика аналізу

Для кожного зсуву визначалося:

Мінімальна відстань (D) від центроїда зсуву до найближчої дороги.

Абсолютна висота дороги (H_d) у точці, найближчій до зсуву (визначено за DEM).

Абсолютна висота зсувного тіла (H_z) у точці центроїда зсуву.

Різниця висот (ΔH):

$$\Delta H = H_z - H_d . \quad (1)$$

На основі значення ΔH усі зсуви класифіковано на три групи:

$\Delta H < 0$ — зсув нижче дороги;

$\Delta H = 0$ — зсув на рівні дороги;

$\Delta H > 0$ — зсув вище дороги.

Схема аналізу

Умовно весь алгоритм можна подати у вигляді блок-схеми (рис. 1):

Визначення центроїда полігону зсуву.

Обчислення найкоротшої відстані до дороги.

Вибір точки перетину з DEM для дороги та зсуву.

Визначення абсолютних висот H_d та H_z .

Розрахунок ΔH та класифікація зсуву за трьома групами.

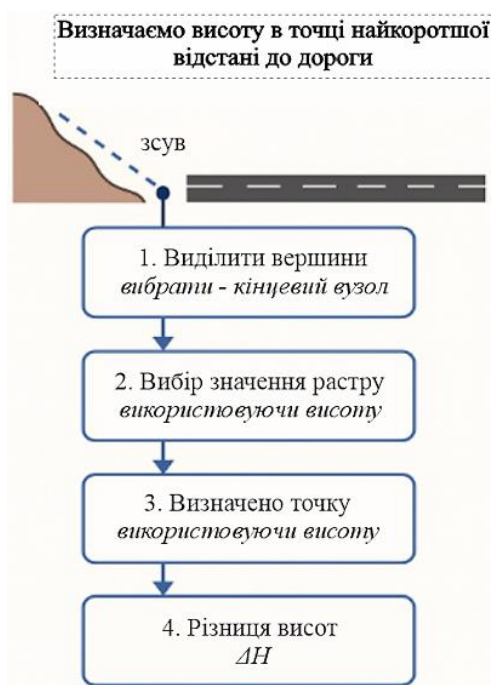


Рисунок 1 — Схема аналізу просторового розташування зсувів відносно доріг [8]

Таким чином, обрана методика дозволяє врахувати не лише відстань між зсувом та дорогою, але й вертикальне положення, що суттєво підвищує точність оцінки ризиків для дорожньої інфраструктури у гірських умовах.

Результати

Аналіз просторових даних дозволив оцінити взаємне розташування 467 зсувів та автомобільних доріг у межах Верховинського й Косівського районів Івано-Франківської області. Основна увага приділялася різниці абсолютних висот між зсувним тілом і автомобільною дорогою (ΔH).

Класифікація за групами

За значенням ΔH виділено три групи зсувів (табл. 1):

1. Група $\Delta H < 0$ — зсуви нижче дороги.

Усього — 202 випадки (43,2 %). Для цієї групи характерна найбільша варіабельність відстаней до дороги — від 2,4 м до 1 524,4 м. Середня відстань становить 206,8 м. Середня висота дороги в цій групі — 741,5 м, тоді як середня висота зсувного тіла — 705,5 м. Максимальна різниця у висоті сягає — 296 м, що вказує на значне положення зсувів унизу схилів.

2. Група $\Delta H = 0$ — зсуви на рівні дороги.

Найменш чисельна категорія — 29 випадків (6,3 %). Середня відстань до дороги — лише 20,1 м, що зумовлено безпосереднім розташуванням транспортних шляхів на схилових тілах або старих зсувних формаціях. Середні висотні значення для дороги та зсувів збігаються (647,1 м).

3. Група $\Delta H > 0$ — зсуви вище дороги.

Найбільша група — 236 випадків (50,5 %). Середня відстань до дороги — 169,5 м, середня різниця у висоті становить 34,1 м. Середня висота дороги у цій групі — 655,1 м, а зсувних тіл — 689,2 м. Ця категорія є найбільш небезпечною, оскільки активізація таких зсувів може призвести до повного перекриття дорожнього руху [8].

Таблиця 1

Середні параметри просторового положення зсувів відносно доріг

Група зсувів	Кількість випадків	Середня відстань до дороги, м	Середня висота дороги, м	Середня висота зсуву, м	Середнє ΔH , м	ΔH min, м	ΔH max, м
$\Delta H < 0$ (нижче дороги)	202 (43,2 %)	206,8	741,5	705,5	-36,0	-296	-1
$\Delta H = 0$ (на рівні)	29 (6,3 %)	20,1	647,1	647,1	0,0	0	0
$\Delta H > 0$ (вище дороги)	236 (50,5 %)	169,5	655,1	689,2	+34,1	+1	+218

Просторовий розподіл

На карті (рис. 2) показано територіальний розподіл зсувів відносно дорожньої мережі. Найбільша концентрація зсувів, розташованих вище дороги, спостерігається у межах гірських долин річок Чорний Черемош та Пістинька, де дороги проходять вздовж стрімких схилів. Зсуви нижче дороги переважають на ділянках із терасовим рельєфом.

Статистичний аналіз

Графік розподілу ΔH (рис. 3) демонструє асиметричність даних із чітким переважанням позитивних значень. Це свідчить про домінування зсувів, які потенційно загрожують транспортним шляхам зверху. Для групи $\Delta H < 0$ спостерігається значний розкид значень, що вказує на складність рельєфу та варіативність процесів.

Результати дослідження свідчать, що найбільшу небезпеку для дорожньої інфраструктури становлять зсуви, розташовані вище автомобільної дороги. Водночас наявність значної частки зсувів нижче доріг підтверджує потребу у постійному моніторингу ерозійних процесів та їхнього впливу на стабільність схилів.

Обговорення

Результати проведеного дослідження свідчать, що більшість зсувів у межах Верховинського та Косівського районів Івано-Франківської області розташовані вище автомобільної дороги (група $\Delta H > 0$). Це підтверджує висновки європейських дослідників щодо найбільшої небезпеки саме від зсувів, які формуються над транспортною інфраструктурою. У [4] наголошують, що вертикальне положення зсувів є критичним параметром під час оцінки ризиків для доріг, оскільки саме такі процеси мають найбільшу ймовірність перекриття транспортних шляхів. Аналогічні результати отримані і для гірських регіонів Азії та Південної Америки, де дорожня інфраструктура зазнає постійних загроз через активні схилі процеси.

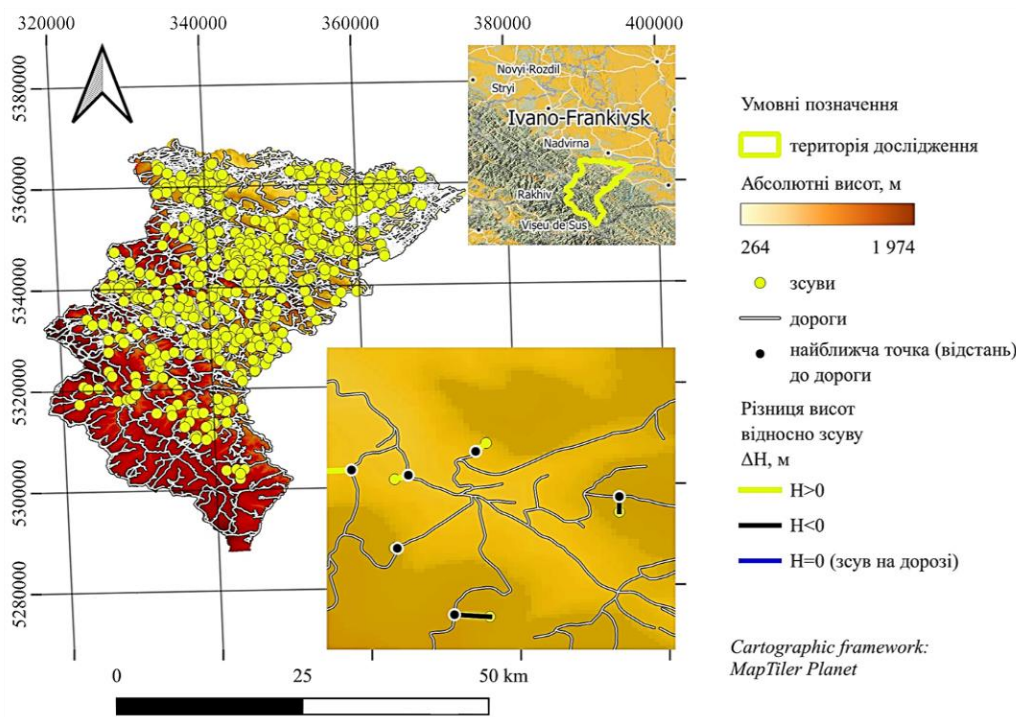


Рисунок 2 — Карта просторового розташування зсувів відносно доріг [8]

Порівняння з дослідженнями в інших гірських системах світу (Альпи, Кавказ, Гімалаї) демонструє подібність просторових закономірностей. У більшості регіонів дороги прокладаються вздовж річкових долин, де вони піддаються впливу зсувів із крутих схилів [5]. Проте Карпати мають певні відмінності: нижчі відносні висоти та значна зволоженість глинистих порід зумовлюють більш часті, але відносно менш масштабні зсувні події. У той час як в Альпах та Гімалаях характерними є катастрофічні обвали великого обсягу, у Карпатах домінують численні локальні зсуви середньої потужності, які часто повторюються на тих самих ділянках.

Методика, запропонована у цьому дослідженні, довела свою ефективність для класифікації зсувів за висотним положенням відносно доріг. Використання показника ΔH у поєднанні з відстанню до проїзної частини дозволяє швидко виокремлювати найбільш ризикові ділянки для моніторингу. Це особливо важливо у контексті розбудови транспортної інфраструктури, коли необхідно визначати пріоритети для інженерних заходів та розробки проєктів стабілізації схилів. Такий підхід може бути інтегрований у системи управління дорожньою мережею як інструмент попереднього скринінгу небезпечних територій.

Разом з тим, результати дослідження мають певні обмеження. По-перше, точність оцінки значною мірою залежить від просторової роздільності цифрової моделі рельєфу. У даному випадку використано DEM із роздільністю 30 м, що є достатнім для регіональних оцінок, однак для локального проектування чи прогнозування інженерної стабільності доцільно застосовувати дані високої роздільності (LiDAR, фотограмметрія з БПЛА). По-друге, проведений аналіз має статичний характер і не враховує сезонної динаміки зсувів. Активізація процесів у Карпатах тісно пов'язана з інтенсивними дощами та весняним сніготаненням, що потребує часових рядів даних дистанційного зондування для більш повної картини.

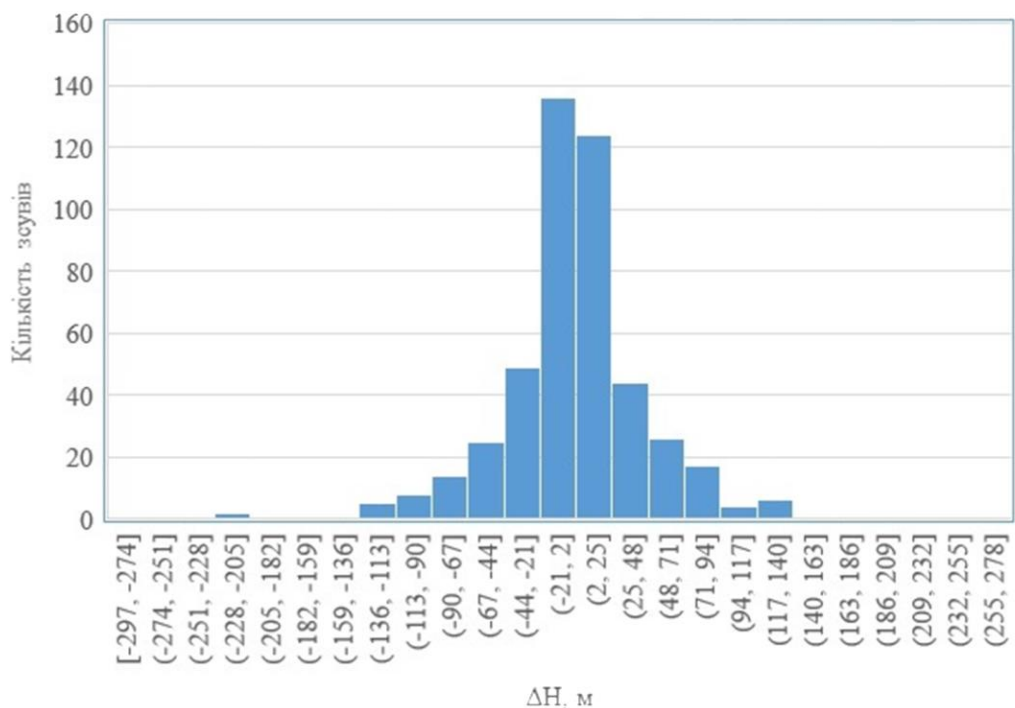


Рисунок 3 — Розподіл зсувів за різницею висот (ΔH)

По-третє, картографічна інформація щодо зсувів базується на архівних і кадастрових даних, які можуть не відображати найсвіжіші зміни. Тому результати просторового аналізу потребують обов'язкової польової верифікації.

Отже, отримані висновки є важливим кроком у напрямі інтеграції геоінформаційних технологій у практику планування дорожньої інфраструктури. Запропонований підхід не замінює класичних інженерно-геологічних досліджень, але дозволяє значно зменшити часові та фінансові витрати на початковому етапі оцінки ризиків. Його застосування в комплексі з польовими обмеженнями та сучасними методами дистанційного зондування створює перспективи для побудови інтегрованої системи моніторингу зсувонебезпечних ділянок у Карпатах.

Висновки

- GIS-аналіз просторового розташування зсувів дозволив виокремити три групи залежно від відносної висоти.
- Найбільш небезпечними є зсуви вище автомобільної дороги ($\Delta H > 0$), які становлять 50,5 % усіх випадків.
- Зсуви нижче дороги формують ризики ерозійних процесів та змивів.
- Зсуви на рівні дороги вказують на будівництво на нестабільних схилах.
- Запропоновано впроваджувати системний моніторинг у ГІС для управління дорожньою інфраструктурою.

Список літератури

1. Korup O. Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*. 2005. Vol. 2(1). P. 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0042-0>.
2. Pardeshi S. D., Autade S. E., Pardeshi S. S. Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*. 2013. Vol. 2(1). P. 523.
3. Guzzetti F., Reichenbach P., Cardinali M., Galli M., Ardizzone F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*. 2005. Vol. 72(1–4). P. 272–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002>.
4. Van Westen C. J., Castellanos E., Kuriakose S. L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment. *Engineering Geology*. 2008. Vol. 102(3–4). P. 112–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>.
5. Lacasse, S., Nadim, F. Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy. In: Sassa, K., Canuti, P. (eds) *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_3.
6. Ivanik O., Shevchuk V., Kravchenko D., Yanchenko V., Shpyrko S., Gadiatska K. Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*. 2019. Vol. 20(4). P. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/102964>.
7. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. Assessment of landslide hazard risks on the example of the land cadastre of the Kosiv district. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. 2023. No. 98. P. 36–42. DOI: <https://doi.org/10.23939/istecap2023.98.050>.
8. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. GIS technologies in planning and controlling road construction and maintenance in areas with active landslide processes *International Conference «Synergy in Terra – 2025»* (2-13 June 2025, Lviv, Ukraine). [Synergy in Terra – 2025-019] URL: https://drive.google.com/file/d/1De3ILimXfrDjJfJvB5IL0W_cLVbqkVB/view.

References

1. Korup, O. (2005). Distribution of landslides in southwest New Zealand. *Landslides*, 2(1), 43–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10346-004-0042-0> [in English].
2. Pardeshi, S. D., Autade, S. E., & Pardeshi, S. S. (2013). Landslide hazard assessment: recent trends and techniques. *SpringerPlus*, 2(1), 523 [in English].
3. Guzzetti, F., Reichenbach, P., Cardinali, M., Galli, M., & Ardizzone, F. (2005). Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale. *Geomorphology*, 72(1–4), 272–299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.06.002> [in English].
4. Van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. *Engineering Geology*, 102(3–4), 112–131. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010> [in English].
5. Lacasse, S., Nadim, F. (2009). Landslide Risk Assessment and Mitigation Strategy. In: Sassa, K., Canuti, P. (eds) *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-69970-5_3 [in English].
6. Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., & Gadiatska, K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/102964> [in English].
7. Kasiyanchuk, D., & Shtohryn, L. (2023). Assessment of landslide hazard risks on the example of the land cadastre of the Kosiv district. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 98, 36–42. DOI: <https://doi.org/10.23939/istecap2023.98.050> [in English].
8. Kasiyanchuk D., Shtohryn L. GIS technologies in planning and controlling road construction and maintenance in areas with active landslide processes *International Conference «Synergy in Terra – 2025»* (2-13 June 2025, Lviv, Ukraine). [Synergy in Terra – 2025-019] URL: https://drive.google.com/file/d/1De3ILimXfrDjJfJvB5IL0W_cLVbqkVB/view [in English].

Dmytro Kasiianchuk, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4761-5320>

Liudmyla Shtohryn, Ph.D., Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0001-8381-1236>

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine

PROCESSING OF GEOMEASUREMENT IN THE TASKS OF PLANNING AND CONTROL OF CONSTRUCTION AND OPERATION OF ROADS IN LANDSCAPE AREAS USING GIS

Abstract

Introduction. The development of transport infrastructure in Ukraine's mountainous regions faces the problem of active landslide processes, which have a significant impact on the stability of road networks.

Problem statement. A significant proportion of roads in the Carpathians pass through areas of increased geological risk. Construction work on roads can disrupt the natural stability of slopes (through cutting or embankments), alter drainage systems and cause moisture to accumulate. At the same time, there is insufficient spatial analysis of the relative location of landslides and the road network, which complicates risk assessment.

Objective. The aim is to study the spatial location of landslides in relation to roads using GIS methods, to categorise landslides by their vertical position and to evaluate their impact on road infrastructure.

Materials and methods. Digital elevation model (DEM) data and vector layers of landslides and motorways were used for the Verkhovyna and Kosiv districts of the Ivano-Frankivsk region. A spatial analysis was performed in QGIS to determine the direction and nature of landslide hazards, calculating the minimum distance to the road and the difference in absolute heights between the landslide body and the road surface.

Results. A total of 467 landslides were analysed. Three groups were identified: Landslides below the road (202 cases): average distance to the road: 206.8 m. Landslides at road level (29 cases): average distance: 20.1 m. Landslides above the road (236 cases): average distance: 169.5 m; average height difference: 34.1 m. The most dangerous landslides are those above the road, as they can block transport routes. Landslides below the road can cause slope erosion and undercutting, reducing slope stability. Landslides at road level reflect deformations on old landslide bodies and can manifest as cracks or subsidence of the road surface.

Conclusions. A GIS analysis of landslides identified three groups based on their relative height. The most dangerous landslides are located above the road (50.5 %), while those below the road pose erosion risks and those at road level indicate unstable slopes. Systematic GIS monitoring is recommended for infrastructure management.

Keywords: road, landslides, GIS, geodetic data, spatial data.