

УДК 630:551.3

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.2-59.22>

ОЦІНКА ДИНАМІКИ ЛІСОВОГО ПОКРИВУ ЗСУВОНЕБЕЗПЕЧНИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE

Рушак В.О., Чепурний І.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
rushchakvolodymyr@gmail.com

У статті представлено результати дослідження просторово-часових змін лісового покриву на зсувонебезпечних територіях Українських Карпат із використанням супутникових знімків та інструментів платформи Google Earth Engine. Основну увагу приділено аналізу ймовірного зв'язку між деградацією лісового покриву і розвитком зсувних процесів. У дослідженні застосовано сучасні методи дистанційного зондування Землі, зокрема аналіз багаторічних супутникових знімків Landsat (1990–2020), а також геоінформаційне моделювання для вивчення змін лісового покриву та їхнього співвідношення із розташуванням зсувів. Досліджувались дві експериментальні ділянки – у Закарпатській та Івано-Франківській областях, де було здійснено оцінку динаміки лісових екосистем та виконано просторовий аналіз стосовно зсувонебезпечних ландшафтів. Застосування вегетаційних індексів, зокрема NDVI, дало змогу виявити зони деградації та відновлення лісу з високою просторовою точністю. Встановлено, що досліджувана ділянка у Закарпатській області демонструє вищий рівень залісненості, але й більшу кількість зсувів у порівнянні з Івано-Франківською ділянкою. Аналіз супутникових даних засвідчив значне зменшення площі лісів у період 2000–2010 років, із найбільш інтенсивною деградацією у Закарпатському регіоні, тоді як у 2010–2015 роках спостерігається часткове відновлення лісового покриву. Виявлено, що більшість зареєстрованих зсувів трапляються на схилах із порушеним або деградованим лісовим покривом, що може свідчити про наявність зв'язку між станом лісів і активізацією зсувних процесів. Отримані результати підтверджують важливість урахування стану лісового покриву як одного з ключових чинників формування зсувної небезпеки та наголошують на необхідності подальших досліджень для глибшого розуміння взаємозв'язку між екосистемною динамікою і природними ризиками. *Ключові слова:* Зсуви, лісовий покрив, геоінформаційний аналіз, дистанційне зондування землі, моніторинг, Google Earth Engine.

Assessment of forest cover dynamics in landsliding-hazardous areas of the Ukrainian Carpathians using the Google Earth Engine platform. Rushchak V., Chepurnyi I.

The article presents the results of a study of spatiotemporal changes in forest cover in landslide-prone areas of the Ukrainian Carpathians using satellite images and Google Earth Engine platform tools. The main attention is paid to the analysis of the probable connection between forest cover degradation and the development of landslide processes. The study used modern methods of remote sensing of the Earth, in particular, the analysis of multi-year Landsat satellite images (1990–2020), as well as geoinformation modeling to study changes in forest cover and their correlation with the location of landslides. Two experimental sites were studied – in the Zakarpattia and Ivano-Frankivsk regions, where the dynamics of forest ecosystems were assessed and a spatial analysis of landslide-prone landscapes was performed. The use of vegetation indices, in particular NDVI, made it possible to identify areas of forest degradation and restoration with high spatial accuracy. It was found that the studied area in the Transcarpathian region demonstrates a higher level of forest cover, but also a higher number of landslides compared to the Ivano-Frankivsk area. Analysis of satellite data showed a significant decrease in forest area in the period 2000–2010, with the most intensive degradation in the Transcarpathian region, while in 2010–2015 there was a partial restoration of forest cover. It was found that the majority of registered landslides occur on slopes with disturbed or degraded forest cover, which may indicate a connection between the state of forests and the activation of landslide processes. The results obtained confirm the importance of taking into account the state of forest cover as one of the key factors in the formation of landslide hazard and emphasize the need for further research to better understand the relationship between ecosystem dynamics and natural risks. *Key words:* Landslides, forest cover, geoinformation analysis, remote sensing, monitoring, Google Earth Engine.

Постановка проблеми. Однією з ключових задач під час здійснення екологічного моніторингу зсувонебезпечних територій є виявлення чинників, що сприяють активізації зсувних процесів, а також оцінка просторово-часової динаміки таких процесів. Особливого значення набуває вивчення стану рослинного покриву як одного з природних регуляторів стійкості схилів. Деградація лісових екосистем або зміна структури лісового покриву може суттєво впливати на стабільність схилів і провокувати розвиток зсувів.

У регіоні Українських Карпат, що характеризується складною геоморфологічною будовою, активними геологічними процесами та високою антропогенною навантаженістю, проблема зсувів є особливо актуальною. За останні десятиліття кількість зареєстрованих зсувів у цьому регіоні значно зросла, що пов'язано як зі зміною кліматичних умов, так і з інтенсивною вирубкою лісу.

Гірські лісові екосистеми відіграють важливу роль у регулюванні гідрологічного режиму, акумуляції вологи, протидії ерозійним процесам, стабіліза-

ції схилів. Проте зниження площі лісового покриття, фрагментація масивів та вирубки поблизу схилів можуть призводити до підвищення зсувонебезпеки.

Актуальність дослідження. В умовах зростання інтенсивності кліматичних змін та антропогенного навантаження на гірські ландшафти Українських Карпат спостерігається підвищення частоти та масштабу зсувних процесів. Особливу небезпеку становить деградація лісового покриття, що відіграє ключову роль у формуванні гідрологічного режиму, фіксації ґрунтів і стабілізації схилів. Ліси зменшують поверхневий стік, регулюють вологість ґрунтів і слугують природним бар'єром проти ерозійних процесів. Однак через вирубку, зміну землекористування та інші впливи їх здатність до природного захисту територій знижується. У зв'язку з цим виникає потреба в оперативних та достовірних методах моніторингу змін лісового покриття. Використання супутникових знімків і платформи Google Earth Engine дозволяє виявляти критичні зони, прогнозувати ризики активізації зсувів і формувати ефективні стратегії збереження природного покриття гірських територій.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. В Україні моніторинг екзогенних геологічних процесів та зсувних процесів зокрема покладений на Державну службу геології та надр України, проте актуалізація даних кадастру зсувних процесів викликає питання. В останні роки ведуться роботи щодо створення геопорталу єдиної державної електронної геоінформаційної системи де передбачений розділ щодо небезпечних екзогенних геологічних процесів. Дані щодо лісових ресурсів наявні на геопорталі «Ліси України», доступ до якого є обмеженим. У даній роботі здійснено аналіз взаємозв'язку між змінами лісового покриття та поширенням зсувних процесів з використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем. Основна увага зосереджена на геоінформаційному просторовому моделюванні за допомогою платформи Google Earth Engine, що дозволяє врахувати не лише факт наявності або відсутності лісу, а й часову динаміку його змін. Дослідження зв'язку динаміки лісового покриття з розвитком зсувних процесів дозволить обґрунтовано використовувати чинник рослинності у системах прогнозування розвитку зсувів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика взаємозв'язку між змінами лісового покриття та розвитком зсувних процесів активно досліджується як в Україні, так і за кордоном. У багатьох роботах наголошується на ключовій ролі лісових екосистем у регулюванні водного балансу, зміцненні схилів і зменшенні ризику розвитку зсувів. У роботі [1] досліджено вплив вирубки лісів на зсувну небезпеку в Карпатах і підкреслено важливість лісів як стабілізуючого чинника.

Значний науковий інтерес викликає застосування платформи Google Earth Engine (GEE) для моніторингу змін лісового покриття. Так, у дослідженні [1] використано супутникові дані Landsat для визначення динаміки лісів у Карпатському регіоні. Автор підкреслив ефективність GEE у виявленні ділянок інтенсивної вирубки у важкодоступних районах. У роботі [2] проаналізовано зміни лісового покриття в Карпатах за допомогою супутникових даних та доведено, що використання GEE дозволяє виявити тенденції вирубки лісів у гірських районах. У свою чергу робота [3] поєднала GEE з GIS-аналізом для виявлення зон підвищеного зсувного ризику поблизу туристичних об'єктів. Подібні дослідження для зсувних процесів виконано у роботі [4]. Геоінформаційний аналіз динаміки лісового покриття та його впливу на розвиток зсувів проведено у роботі [5]. Регіональне прогнозування розвитку зсувних процесів, принципи якого описано у роботах [6-8] передбачає комплексну оцінку просторових та часових факторів, що ініціюють розвиток зсувних процесів. Серед таких факторів є фактор рослинного покриття, який у зазначених дослідженнях враховується у вигляді кількісної характеристики – відстань до лісу. Аналіз робіт [9-11] свідчить про те, що методи дистанційного зондування, особливо на платформі GEE, є перспективними для оперативного моніторингу лісів і оцінки ризиків природних катастроф.

Новизна. У межах даного дослідження запропоновано новий підхід до оцінки впливу лісового покриття на розвиток зсувних процесів, що базується на використанні хмарного середовища Google Earth Engine (GEE). Уперше було проведено комплексний аналіз просторово-часової динаміки лісового покриття у зсувонебезпечних районах Українських Карпат у ретроспективі 30 років (1990–2020 рр.). Використання геоінформаційних методів аналізу дозволило виявити зсуви, розташовані безпосередньо в лісі, а також ті, що виникли після часткової або повної деградації лісової смуги. Отримані результати можуть бути застосовані під час прогнозного моделювання розвитку зсувних процесів.

Методологічне або загальнонаукове значення. Застосування платформи Google Earth Engine (GEE) як інструменту для аналізу змін лісового покриття в межах зсувонебезпечних територій Українських Карпат демонструє широкий потенціал хмарних обчислень у геоекологічних дослідженнях. Методика передбачає використання багаторічних супутникових знімків Landsat, розрахунок вегетаційних індексів (NBR, NDVI), проведення картометричних та аналітичних операцій у середовищі ГІС, на основі інтеграції з даними про зсуви. Вона дозволяє здійснювати просторово-часову оцінку впливу деградації лісів на активізацію зсувів із високою точністю та оперативністю. Запропонований підхід створює наукову базу для вдосконалення систем управління

ризиками та формування інтегрованих екологічних і ландшафтних стратегій. Його поєднання з класичними геоекологічними методами дозволяє посилити аналітичну складову досліджень зсувів, підвищуючи ефективність прийняття управлінських рішень у сфері природокористування та охорони довкілля.

Виклад основного матеріалу. У якості експериментальних ділянок з оцінки динаміки лісового покриву для зсувонебезпечних територій обрано дві ділянки розміром 25×25 м, які розташовані в Українських Карпатах (рис. 1).

Перша ділянка розташована у східній частині Закарпатської області, включає у свої межі такі населені пункти, як Колочава, Руська Мокра, Лопухів, Усть Чорна. У її межах згідно каталогу зсувів ДНВП «Геоінформ України» зареєстровано 236 зсувів, що становить 0,38 зсувів/км². Інша ділянка розташована на півдні Івано-Франківської області в основному у межах Верховинського району та включає такі основні населені пункти, як Верховина, Кривопілля,

Брустурів, Верхній Ясенів, Довгопілля тощо. У її межах зареєстровано 157 зсувів. Остання масова зареєстрована активізація зсувів тут спостерігалась у 2008 році.

Для зазначеної території досліджень виконано розрахунок динаміки лісового покриву на основі сателітних даних Landsat з використанням платформи Google Earth Engine (GEE).

Для вказаних ділянок на платформі GEE проаналізовано супутникові знімки Landsat 4, 5, 8, 9 за період 1990–2020 рр. Обробка даних Landsat включала усунення хмарності за допомогою QA_PIXEL, перерахунок значень пікселів у відображенні коефіцієнти. Визначення лісового покриву відбувалось шляхом обчислення вегетаційного індексу, як відношення різниці ближнього інфрачервоне випромінювання, NIR (канал B5 у Landsat 8/9 або B4 у Landsat 4/5) та короткохвильового інфрачервоного випромінювання, SWIR (канал B7 у Landsat 8/9 або B5 у Landsat 4/5) до їх суми. Виділення лісу за поро-

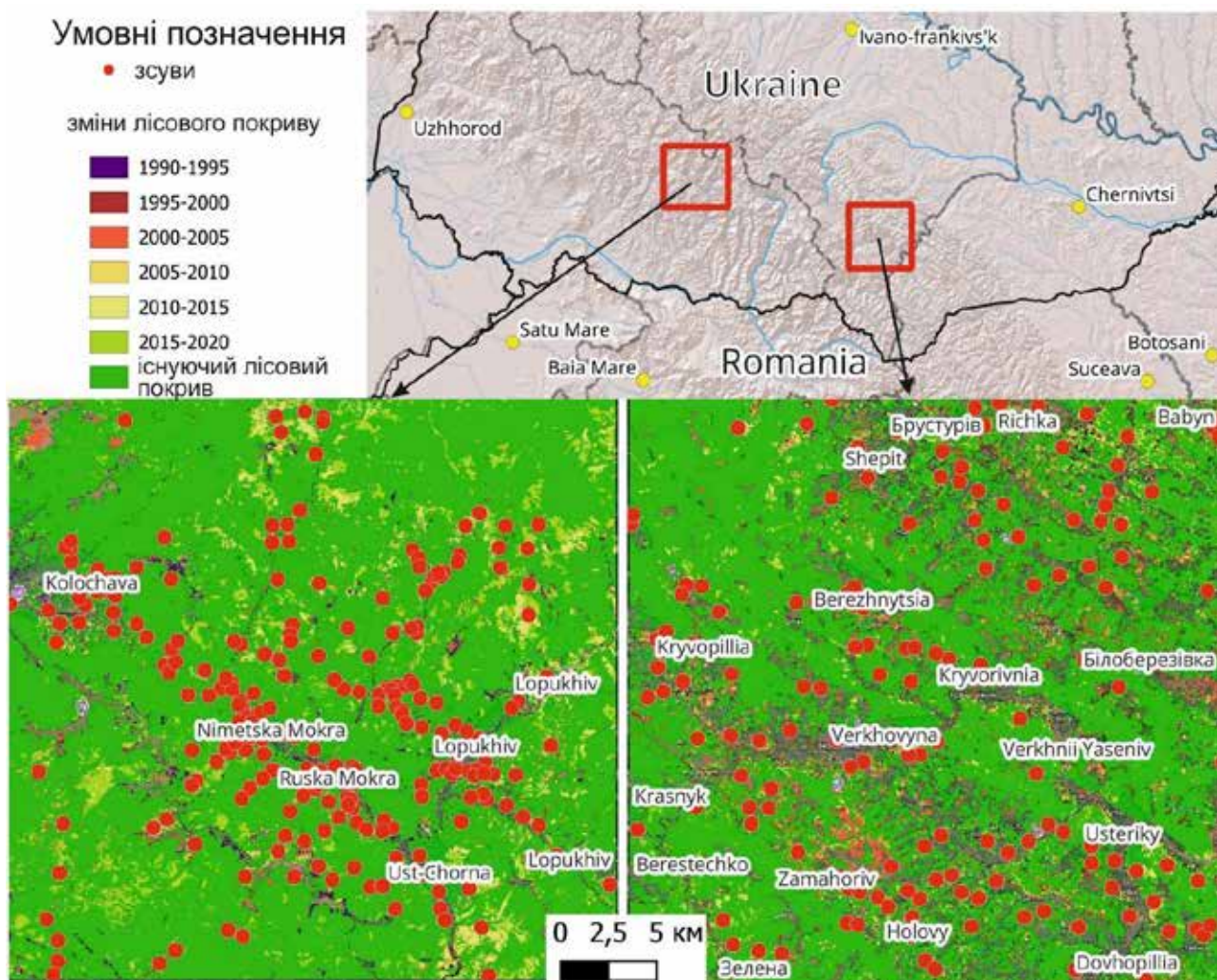


Рис. 1. Картограми динаміки лісового покриву для територій у межах Закарпаття (а) та Івано-Франківської області (б) суміщені з точками прояву зсувів

говим значення вегетаційного індексу більше 0,6. Розрахунок площі лісу у гектарах.

У результаті отримано карти зміни лісового покриття за період 1990–2020 рр (рис. 1) та графіки динаміки площі лісового покриття для двох ділянок досліджень (рис. 2). Як випливає з графіків, наведених на рисунку 2, ділянка, що розташована у Закарпатті має загалом більшу територію покриту лісом, також тут спостерігається вища кількість зсувів. Деградація лісового покриття спостерігається для обох ділянок у період з 2000 по 2010 рік. Проте більш інтенсивною на проміжку з 2000 до 2005 року вона на ділянці, розташованій у Закарпатті. Також можна спостерігати більш інтенсивне відновлення лісового покриття з 2010 до 2015 року для цієї ж ділянки.

На рис. 1 на карти динаміки лісового покриття накладено точки розвитку зсувів, які зареєстровані у каталозі зсувів ДНВП «Геоінформ України». Для кожної точки зсуву за допомогою геоінформаційного аналізу визначено стан рослинного покриття. Для ділянки, яка розташована у Закарпатті встановлено, що 15 з 236 точок не мають лісового покриття, 5 втратили лісовий покрив з 1990 по 2000 рік, 5 – з 2000 по 2010, 12 – з 2010 по 2020. Для ділянки, яка розташована у Івано-Франківській області встановлено, що 36 з 157 точок не мають лісового покриття, 1 втратив лісовий покрив з 1990 по 2000 рік, 13 – з 2000 по 2010, 3 – з 2010 по 2020.

З метою більш повної оцінки залісеності зсувних ділянок, для кожного точкового об'єкту створено буферну зону радіусом 100 м та виконано просторовий геоінформаційний аналіз, щодо наявності змін лісового покриття для зон навколо центроїдів зсувних ділянок. На рисунку 3 наведено гістограму, яка характеризує результати буферного аналізу. Для ділянки, яка розташована на території Закарпаття встановлено, що 145 зсувів у радіусі 100 м від центроїда мають порушення лісового покриття, причому 66 з них розташовані у межах суцільного лісо-

вого масиву та містять пікселі з втратами лісового покриття, інші 79 зсувів мають пікселі з відсутністю лісового покриття, що може свідчити про їхнє розташування поблизу краю лісу.

Для ділянки, яка розташована на території Івано-Франківської області встановлено, що для 132 зсувів у зоні радіусом 100 м від центроїда проявляється відсутність лісового покриття. З них лише 16 зсувів розташовані у межах суцільного лісового масиву та містять пікселі з втратами лісового покриття у радіусі 100 м. Загалом 112 зсувів розташовані поблизу межі лісу. Крім того, для чотирьох зсувів лісовий покрив повністю відсутній.

Головні висновки. Аналіз просторової динаміки лісового покриття та його змін у контексті розвитку зсувних процесів у межах двох зсувонебезпечних ділянок Українських Карпат проведено на основі супутникових знімків Landsat за 1990–2020 рр. з використанням платформи Google Earth Engine. Застосування вегетаційних індексів дозволило ефективно виявити зміни в рослинному покриві та здійснити ретроспективну оцінку тенденцій деградації або відновлення лісів.

У результаті дослідження встановлено, що досліджувана ділянка у Закарпатській області характеризується як більшою площею залісеності, так і вищим рівнем концентрації зсувних процесів. Незважаючи на відносно високий рівень лісового покриття, на цій ділянці виявлено 145 з 236 зсувів із просторовими порушеннями рослинності в радіусі 100 м від центроїдів. Для ділянки в Івано-Франківській області таких зсувів – 132 з 157.

Отримані результати засвідчують, що хоча лісовий покрив не є єдиним або визначальним чинником розвитку зсувів, він виступає важливим просторовим індикатором зсувонебезпечних територій. Особливо показовим є виявлення активізації зсувів у зонах поблизу межі лісу або на ділянках, що втратили лісовий покрив у попередні десятиліття.

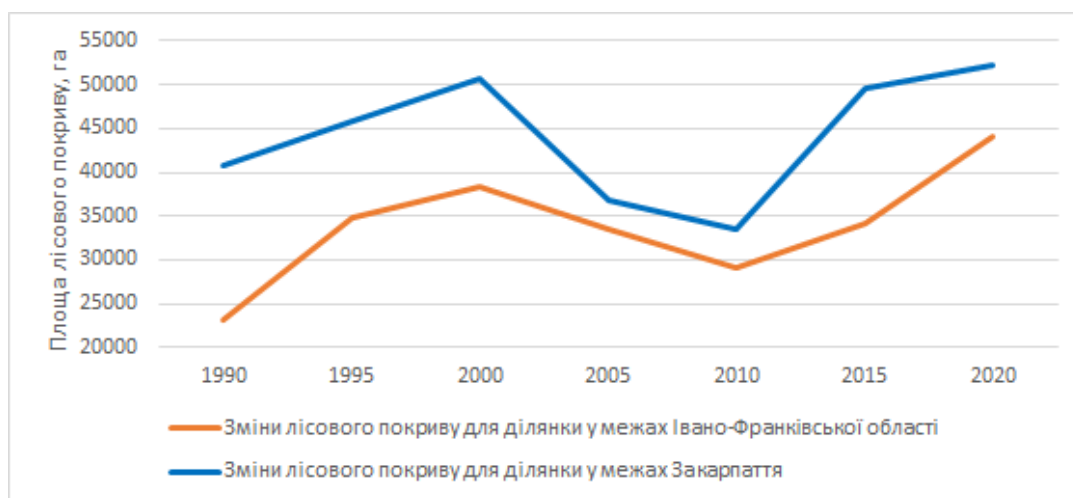


Рис. 2. Графіки динаміки лісового покриття для території досліджень

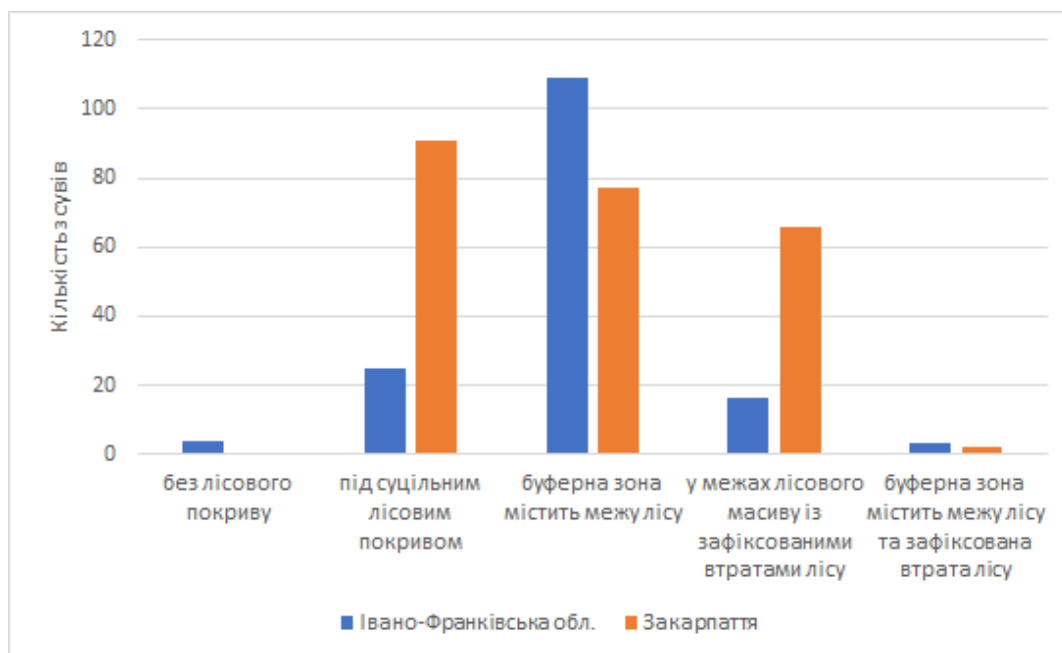


Рис. 3. Результати буферного аналізу

Перспективи використання результатів дослідження. У подальших дослідженнях доцільним є глибше вивчення взаємозв'язків між динамікою лісу та зсувними процесами з урахуванням морфометричних характеристик місцевості (висота, ухил, експозиція), а також актуалізація баз даних про зсуви, включно з часовими параметрами їх активізації. Такі підходи можуть сприяти формуванню більш точних

моделей прогнозування зсувів у гірських районах. Отримані результати мають широке прикладне значення для вдосконалення системи моніторингу зсувонебезпечних територій в Українських Карпатах. Розроблена методика може бути використана установами та організаціями для оперативного виявлення критичних зон із деградованим лісовим покривом, що потенційно схильні до розвитку зсувів.

Література

- Дубровський М. І. Моніторинг змін лісового покриву в Українських Карпатах за супутниковими даними. Екологічні науки. 2020. № 2(29). С. 17–25.
- Chaskovsky O. H., Hrynyk H. H. Estimation of losses of forest cover of the Ukrainian Carpathians by remote methods based on the materials of open sources of satellite information. Scientific Bulletin of UNFU. 2020. Vol. 30, № 1. P. 66–73. DOI: 10.36930/40300111.
- Стефанюк В. В. ГІС-аналіз ризику розвитку зсувів у рекреаційних зонах Карпат. Природничий альманах. 2022. № 10. С. 49–55.
- Davybida L., Papis J. Geomorphological Characteristics on the Landslides Observed Within the Carpathian Region in Lesser Poland Voivodeship and Ivano-Frankivsk Region on Ukraine. Fourth EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities, 6–8 Sept. 2023, Dubrovnik, Croatia. EAGE, 2023. Vol. 2023, № 1. P. 1–5.
- Chepurnyi I., Rushchak V., Chepurna T. Spatial Analysis of the Relationship between the Distribution of Landslide Areas and Forest Cover. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024», 6–8 Feb. 2024, Lviv, Ukraine. 2024. Vol. 2024, Issue 1. P. 1–5. DOI: 10.3997/2214-4609.2024510017.
- Kasiyanchuk D., Kuzmenko E., Chepurna T., Chepurnyi I. Calculation of the environmental and geological landslide risk estimate. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. Vol. 1(10). P. 18–25.
- Shtohryn L., Kasiyanchuk D., Kuzmenko E. The problem of long-term prediction of landslide processes within the Transcarpathian inner depression of the Carpathian region of Ukraine. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences. 2020. Vol. 15. P. 157–166. DOI: 10.26471/cjees/2020/015/118.
- Прогнозування зсувів / за ред. Кузьменка Е. Д. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ, 2016. 601 с.
- Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R. et al. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Science. 2013. Vol. 342, № 6160. P. 850–853. DOI: 10.1126/science.1244693.
- Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
- Kennedy R. E., Yang Z., Cohen W. B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr-Temporal segmentation algorithms. Remote Sensing of Environment. 2010. Vol. 114. P. 2897–2910. DOI: 10.1016/j.rse.2010.07.008.