

## ВИКОРИСТАННЯ ПЛАТФОРМИ GOOGLE EARTH ENGINE ДЛЯ СИСТЕМАТИЗАЦІЇ ДАНИХ ГЕОЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ

Давибіда Л.І.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу  
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ  
lidia.davybida@nung.edu.ua

Карпатський регіон України відзначається значною географічною різноманітністю і складною структурою ландшафтів, які піддаються зростаючому антропогенному тиску. Ці виклики включають деградацію земель, водні кризи та вплив змін клімату, які стають загальними проблемами для країн Карпатського Євросоюзу. В умовах таких викликів систематизація даних про природні ресурси, навколишнє середовище та екологічні ризики є критично важливою. Для цього дослідження була створена комплексна база даних на основі супутникового моніторингу, реалізованого за допомогою можливостей хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine (GEE). Ця база даних забезпечує основу для аналізу та моделювання просторово-часових змін компонентів довкілля, оцінки ризиків виникнення повеней, посух та небезпечних геологічних процесів у межах Карпатського регіону. Створена база даних відіграє ключову роль у розробці політики та програм, спрямованих на вирішення екологічних проблем регіону, включаючи ініціативи щодо трансграничного співробітництва та управління природними ресурсами. Вона включає базові векторні шари топографічної основи та тематичні набори даних, такі як мультиспектральні та радарні супутникові знімки (Sentinel, Landsat, MODIS), кліматичні та метеорологічні дані (ERA5), інформацію про водні ресурси (GRACE), стан атмосферного повітря (Sentinel-5P), картографічні шари класифікації земного покриву (LULC) та цифрові моделі рельєфу (SRTM). Формування цієї бази передбачає ретельну систематизацію та впорядкування даних супутникового моніторингу й інформації з інших джерел. Це включає первинну обробку даних, яка охоплює нормалізацію, корекцію, обрізку, фільтрацію та інтерполяцію. Застосування хмарного сховища для зберігання великих обсягів геоданих забезпечує ефективне управління інформацією та полегшує доступ до неї для подальшого аналізу і прийняття управлінських рішень.

*Ключові слова:* геоecологічний моніторинг, геоінформаційні системи, бази геоданих, оцінка екологічного ризику.

**Using the Google Earth Engine for the systematization of geoeological research data: the case of the Carpathian region.**  
Davybida L.

The Carpathian region of Ukraine is characterized by significant geographical diversity and complex landscapes, which are increasingly impacted by human activities. These challenges include land degradation, water crises, and the effects of climate change, which have become common issues for the countries within the Carpathian Euroregion. In response to these challenges, the systematization of data on natural resources, the environment, and environmental risks is crucial. For this study, a comprehensive database was developed based on satellite monitoring, utilizing the capabilities of the Google Earth Engine (GEE) cloud-based geoinformation platform. This database serves as the foundation for analyzing and modeling spatial and temporal changes in environmental components, as well as assessing the risks of floods, droughts, and geological hazards within the Carpathian region. The created database plays a key role in the development of policies and programs aimed at addressing environmental issues in the region, including initiatives for transboundary cooperation and natural resource management. The database includes essential vector topographic layers and thematic datasets, such as multispectral and radar satellite images (Sentinel, Landsat, MODIS), climate and meteorological data (ERA5), water resources information (GRACE), air quality data (Sentinel-5P), land cover classification map layers (LULC), and digital elevation models (SRTM). The creation of this database involves the meticulous systematization and organization of satellite monitoring data, along with information from other sources. This process includes primary data processing steps, such as normalization, correction, cropping, filtering, and interpolation. The use of cloud storage for managing large volumes of geospatial data ensures efficient information management and facilitates access to it for further analysis and decision-making.

*Key words:* geoeological monitoring, geoinformation systems, geodatabases, environmental risk assessment.

**Постановка проблеми.** Традиційні методи збору та аналізу геопросторових екологічних даних часто є обмеженими через високу трудомісткість, фінансові витрати та обмежену доступність даних. Використання сучасних геоінформаційних технологій і даних дистанційного зондування Землі відкриває нові можливості для систематизації та автома-

тизації обробки великих обсягів даних, включаючи супутникові знімки, кліматичні показники, дані про рослинний покрив та інші важливі екологічні параметри. Це дозволяє значно підвищити точність і ефективність регіонального екологічного моніторингу, а також сприяє більш глибокому розумінню довгострокових змін у екосистемах. Геоінформаційна

платформа хмарних обчислень Google Earth Engine (GEE) надає інструменти для збору, обробки, аналізу та обміну даними дистанційного зондування. Вона об'єднує різноманітні набори даних дистанційного зондування і дозволяє оновлення даних майже в реальному часі, а обсяг пам'яті досягає петабайтного рівня [1]. Користувачі можуть розробляти та тестувати власні алгоритми, а також швидко обробляти та обмінюватися результатами, значно підвищуючи ефективність обробки та аналізу великих обсягів геоданих. Для аналізу і моделювання геоecологічних явищ і процесів GEE є ефективним інструментом для дослідження просторової неоднорідності та взаємодії досліджуваних параметрів. Першим важливим етапом проведення подібних досліджень є формування бази геоданих для території інтересу. На сьогодні в GEE доступно понад 80 відкритих наборів даних NASA та інших провайдерів, включаючи зокрема супутникові зображення та набори даних щодо опадів, щільності населення, топографії, земного покриву та клімату, тощо. Колекції даних GEE включають як растрові, так і векторні дані [2].

У якості тестового полігону обрано територію транскордонного Карпатського регіону України, який включає території Львівської, Івано-Франківської, Чернівецької і Закарпатської областей та є частиною Карпатського єврорегіону (рис. 1). Для території дослідження характерними є активізація екологічно несприятливих явищ – паводків, зсувів, ґрунтової ерозії, забруднення атмосферного повітря, забруднення поверхневих і підземних вод, ураження лісів шкідниками та хворобами. Також слід відзначити, що не є оптимальною через значне зменшення покритої лісом площі і процеси урбанізації, структура земельного фонду [3].



Рис. 1. Територія дослідження

**Актуальність дослідження.** Карпати є одним із найбільш екологічно цінних і вразливих регіонів

України та Європи, що зазнають значного впливу антропогенних факторів, таких як вирубка лісів, незаконна забудова, та сільськогосподарська діяльність. Невпинні зміни клімату та часті природні катаклізми, такі як повені та зсуви, також суттєво впливають на екосистеми регіону. Систематизація та аналіз цих змін є необхідними для розробки ефективних заходів щодо збереження екосистем і сталого управління природними ресурсами. Для забезпечення сталого розвитку Карпатського регіону важливо мати інструменти для довгострокового моніторингу екологічних змін. Платформа GEE дозволяє не лише аналізувати історичні дані, але й проводити постійний моніторинг в режимі реального часу, що є критично важливим для швидкого реагування на нові загрози та зміни в екосистемах. Систематизація даних у GEE сприяє підвищенню ефективності моніторингу й звітності щодо екологічного стану регіону, що є важливим для виконання міжнародних зобов'язань України.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Дослідження сприяє розширенню знань про екологічні процеси в Карпатському регіоні, надаючи нові інструменти для аналізу і моніторингу на основі сучасних геоінформаційних технологій. Це відповідає актуальним завданням геоecології, спрямованим на більш точне розуміння природних і антропогенних процесів, та глобальним цілям охорони навколишнього середовища, визначеним у міжнародних угодах, зокрема таких як Конвенція про біологічне різноманіття, Водна рамкова директива ЄС та Паризька кліматична угода.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Застосування геоінформаційних систем і технологій, зокрема й хмарної геоінформаційної платформи GEE, дозволяє ефективно проводити комплексний аналіз екосистемних змін різного масштабу – від локального до глобального [4–5]. Ці інструменти на даний час є незамінними для моніторингу навколишнього середовища, вивчення зміни лісового покриву, зменшення площ водних об'єктів та аналізу динаміки вуглецевих викидів, моделювання та прогнозування гідрометеорологічних явищ і процесів [6–9]. Значну увагу дослідники приділяють і аналізу основних стандартів геопросторових даних і методичних підходів до оцінки придатності первинних джерел даних для побудови єдиної геоінформаційної бази даних [10–11]. Подібні інтегровані бази геоданих у поєднанні з можливостями сучасних хмарних технологій дозволяють легко об'єднувати та аналізувати великі обсяги даних, зібраних з різних джерел, включаючи супутникові зображення, кліматичні моделі, і наземні спостереження. Це сприяє створенню надійних моделей, які можуть використовуватися для довгострокового моніторингу і прийняття обґрунтованих рішень у сфері управління природними ресурсами, прогнозування екологічних змін

і моделювання майбутніх сценаріїв, а також розробки адаптаційних стратегій для різних регіонів.

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. Слід зазначити, що більшість досліджень геоecологічного спрямування, проведених для Карпатського регіону, обмежуються вивченням окремих аспектів змін компонентів довкілля і не використовують повною мірою потенціал сучасних технологій обробки великих масивів геопросторових даних. Також важливим завданням залишається забезпечення відкритого доступу до геоecологічних даних та їх інтеграції для розробки і реалізації ефективних програм екологічного моніторингу.

**Новизна.** Уперше для території Карпатського регіону був застосований інтегрований геоінформаційний підхід до формування бази геоecологічних даних засобами геоінформаційної платформи Google Earth Engine. Це дозволило об'єднати різноманітні дані дистанційного зондування, топографічні карти, кліматичні дані та інформацію з інших відкритих ресурсів в єдину інформаційну систему, забезпечивши комплексну оцінку геоecологічного стану регіону.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Використання Google Earth Engine (GEE) для систематизації даних геоecологічних досліджень забезпечує інтеграцію різноманітних джерел даних, таких як супутникові знімки, кліматичні показники та інформація про рослинний покрив, на одній платформі. Це сприяє комплексному аналізу екологічних процесів. Автоматизація обробки великих обсягів даних завдяки потужним обчислювальним ресурсам GEE значно скорочує час аналізу та підвищує точність результатів. Крім того, платформа надає інструменти для динамічного аналізу даних у часовому розрізі, що дозволяє виявляти довгострокові зміни в екологічних системах. Інтерактивні інструменти візуалізації сприяють легкому представленню результатів досліджень, що полегшує їх сприйняття та використання в освітніх і наукових цілях.

GEE забезпечує базовий інформаційний супровід для систематичного моніторингу стану екосистем, що особливо важливо для регіонів з багатим біорізноманіттям, таких як Карпати. Це дозволяє виявляти тенденції і загрози для біорізноманіття та вчасно вживати заходів для його збереження. Аналіз супутникових даних за допомогою GEE допомагає виявляти вплив кліматичних змін на екологічні системи Карпатського регіону, що є критично важливим для розробки стратегій адаптації та пом'якшення наслідків кліматичних змін. Дослідження сприяють кращому розумінню процесів, що впливають на природні ресурси, такі як ліси, водні ресурси та ґрунти, допомагаючи розробляти ефективні заходи для їхнього збереження та сталого використання. Відкритий доступ до даних і інструментів GEE сприяє міжнародному науковому обміну та співпраці, що важливо для вирішення глобальних екологічних проблем.

**Виклад основного матеріалу.** Формування бази геоданих для подальшого аналізу і моделювання геоecологічних процесів і явищ засобами хмарної платформи передбачає збір та інтеграцію даних супутникового моніторингу й інших джерел, попередню обробку даних (нормалізація та корекція, обрізка, фільтрація, інтерполяція), організацію та збереження великих обсягів геопросторових даних з використанням ГІС та хмарних сховищ. У якості базових векторних шарів топографічної основи і адміністративних меж території дослідження використано цифрову топографічну карту України масштабу 1:100 000 [12]. На основі доступних каталогів GEE сформовано інтегровану базу геоecологічних даних для території Карпатського регіону (рис. 2).

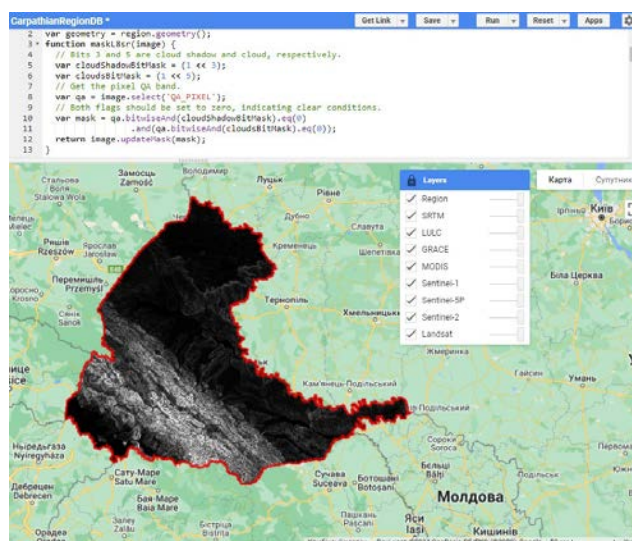


Рис. 2. Перелік шарів бази геоданих та візуалізація одного із них (цифрової моделі рельєфу території Карпатського регіону) у середовищі GEE

Створена база зберігається з використанням ресурсу Google Cloud та систематизує дані за весь доступний період спостережень, включаючи такі набори:

- 1) Sentinel-2, Landsat, MODIS – дані спостережень супутникових системи оптичного діапазону, які надають мультиспектральні зображення високої роздільної здатності для моніторингу рослинності, ґрунтів, водних об'єктів та змін землекористування;
- 2) ERA5 – атмосферні дані для аналізу кліматичних умов;
- 3) GRACE – дані про водні ресурси та зміни в масі земної поверхні;
- 4) Sentinel-5P – дані про якість повітря та концентрацію атмосферних газів;
- 5) Sentinel-1 – дані спостережень радарної системи, яка здійснює збір інформації незалежно від погодних умов і використовується для моніторингу деформацій земної поверхні, оцінки біомаси та виявлення зсувів;

6) LULC – картографічні моделі, які показують розподіл різних типів землекористування;

7) SRTM – цифрова модель рельєфу.

Для отримання більш повного уявлення про процеси, що відбуваються в Карпатському регіоні, GEE дозволяє комбінувати різні набори даних. Наприклад, для моніторингу лісів можна поєднувати оптичні зображення (Sentinel-2, Landsat) з радарними даними (Sentinel-1) для оцінки біомаси, виявлення деградації лісів та моніторингу лісових пожеж. Оцінка впливу зміни клімату можлива завдяки спільному використанню даних ERA5 з даними про температуру поверхні, отриманими із супутникових зображень Landsat, що дозволяє аналізувати тренди зміни температури та опадів. Для моніторингу зсувів може бути ефективним поєднання радарних даних (Sentinel-1) з цифровою моделлю рельєфу (SRTM) для виявлення зон підвищеної нестабільності.

Крім того, GEE надає можливість швидко та ефективно розраховувати різноманітні спектральні індекси на основі даних супутникових спостережень. Так, наприклад, використання індексів NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) для оцінки стану рослинності і LST (Land Surface Temperature) для аналізу температури земної поверхні, дозволяє створювати комплексні моделі, які доцільно застосовувати для моніторингу екосистем та сільськогосподарських угідь, визначення зон теплових островів у містах, тощо (рис. 3).

Головні висновки. Використання платформи Google Earth Engine (GEE) дозволяє систематизувати великі обсяги супутникових даних і поєднувати різні типи екологічної інформації, що сприяє більш детальному та точному аналізу екологічних змін у Карпатському регіоні. Це, у свою чергу, поглиблює розуміння довгострокових процесів, таких як зміни лісового покриву, урбанізація та вплив кліматичних факторів. GEE забезпечує можливість оперативного і довгострокового моніторингу екологічних процесів, що дозволяє швидко реагувати на негативні зміни в екосистемах Карпат. Систематизація даних та їх інтеграція в моделі управління природними

ресурсами сприяє підвищенню ефективності управління лісами, водними ресурсами та біорізноманіттям, а також допомагає запобігти розвитку негативних екологічних явищ і процесів. Використання GEE значно спрощує обробку та аналіз великих масивів геопросторових даних, що знижує витрати часу і ресурсів на проведення наукових досліджень та дозволяє зосередитися на глибокому аналізі даних та інтерпретації результатів, що, в свою чергу, сприяє появі нових знань та підходів до дослідження екологічних проблем.

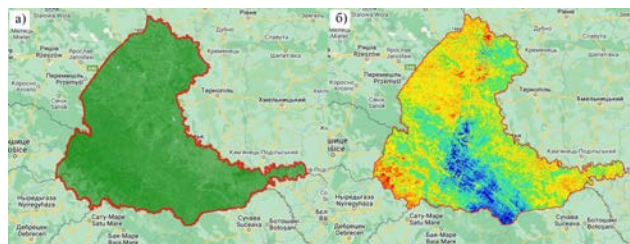


Рис. 3. Просторовий розподіл середніх значень індексів NDVI (а) і LST (б) для Карпатського регіону станом на 2022 рік

Перспективи використання результатів дослідження. Використання платформи Google Earth Engine для систематизації даних гео-екологічних досліджень Карпатського регіону відкриває широкі можливості для наукового аналізу. Однак, існують певні невирішені питання, які потребують подальшого дослідження. Зокрема, це стосується недостатньої точності даних для локальних масштабів, обмеженої доступності даних про землекористування, біорізноманіття та інші важливі екологічні параметри, складності інтеграції місцевих та глобальних даних, а також недостатнього аналізу довгострокових змін, впливу антропогенних факторів і кліматичних змін на екосистеми. Крім того, необхідні подальші дослідження взаємодії між різними екосистемами регіону та розробка моделей для прогнозування майбутніх змін. Застосування нових алгоритмів і моделей, а також розробка сценаріїв майбутнього розвитку є перспективними напрямками для подальших досліджень.

### Література

1. Tamiminia H., Salehi B., Mahdianpari M., Quackenbush L., Adeli S., Brisco, B. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. № 164. P. 152-170. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001>.
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Pyushchenko, S., Thau, D., Moore, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing Environment*. 2017. № 202. P. 18-27.
3. Химинець В. В., Мікловда В.П., Пітюлич М.І., Гапак Н.М. Карпатський регіон у контексті сталого розвитку України. *Науковий вісник Ужгородського університету: Серія: Економіка*. 2012. № 3 (37). С. 40-45.
4. Pham-Duc B., Nguyen H., Phan H., Tran-Anh Q. Trends and applications of Google Earth Engine in remote sensing and Earth science research: a bibliometric analysis using Scopus database. *Earth Sci Inform*. 2023. № 16. P. 2355-2371. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01035-2>.
5. Zhao Q., Yu L., Li X., Peng D., Zhang Y., Gong, P. Progress and Trends in the Application of Google Earth and Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 2021. № 13. P. 3778 p. <https://doi.org/10.3390/rs13183778>.
6. Давибіда, Л. І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2021. № 2 (24). С. 75-86. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2\(24\)-75-86](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86).

7. Lei G., Li A., Bian J., Zhang Z. The roles of criteria, data and classification methods in designing land cover classification systems: evidence from existing land cover data sets. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. № 41 (14). P. 5062-5082. <https://doi.org/10.1080/20964471.2018.1548053>.
8. Бунь Р. А., Густі М. І., Ліщенко В. І. Спеціалізована ГІС для оцінки вуглецевого балансу Карпатського регіону на базі даних дистанційного зондування Землі. *Космічна наука і технологія*. 1998. № 4 (4). С. 145-150.
9. Hazaymeh, K. M. A., Zeitoun, M. Google Earth Engine (GEE) for Modeling and Monitoring Hydrometeorological Events Using Remote Sensing Data. 2024. P. 114–134. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-8771-6.CH006>.
10. Ачасов А. Б., Селіверстов О. Ю., Кот А. Г., Клещ А. А., Мельник Д. О. До питання створення відкритої екологічної геоінформаційної системи. *Людина та довкілля. Проблеми неоекології*. 2022. № 38. С. 97-106. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2022-38-09>.
11. Kroumova Y., Trenkova T., Nedkov S., Ravnachka A. Operational suitability assessment of information resources for a geospatial environmental database unity. *GeoStudies*. 2024. № 1. P. 59-74. <https://doi.org/10.3897/geostudies.1.e120103>.
12. Цифрова топографічна карта України масштабу 1:100 000. *Державне підприємство «Науково-дослідний інститут геодезії і картографії» (ДП «НДІГК»)*. 2019.