

УДК 528.721

Володимир ГЛОТОВ¹, Мирослава БЯЛА²

^{1,2} Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua, myroslava.s.biala@lpnu.ua, ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

<https://doi.org/doi.org/10.23939/jgd2022.02.005>

МОНІТОРИНГ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ГЕОДИНАМІЧНИХ ЗМІН СКЛАДУ КАТЕГОРІЙ ЗЕМЕЛЬ НА ПРИКЛАДІ РЕГІОНУ МІСТА СТЕБНИК ЗА ДАНИМИ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У статті представлено результати аналізу та моніторинг змін складу категорій земель регіону міста Стебник, Львівська область, Україна, як об'єкта підвищеної техногенної небезпеки (на території спостерігаються карстові провали, що є результатом порушення умов консервації підземних шахт видобутку калійної солі). Видобуток здійснювався без закладки відпрацьованих порожнин, в результаті чого утворилися пустоти близько 33 млн. м³, які пролягають під житловим сектором та дорожньою інфраструктурою, і потенційно можуть бути місцем наступного провалу, що загрожує населенню та ландшафтній екосистемі регіону в цілому. Дослідження базувалось на супутникових знімках Landsat 7 та 8 станом на лютий 2002 р. і грудень 2019 р. відповідно, та даних ЕТМ+. Для виявлення й аналізу просторово-часової динаміки змін типів земельного покриття використано методику контрольованої класифікації за методом максимальної вірогідності із поділом на чотири класи. Також апробовано застосування вегетаційного індексу NDVI та проведення на його основі класифікації. Для підвищення точності даних використовувалася растрова фільтрація зображень. Для аналізу зміни складу категорій земель за досліджуваний період використовувався підхід порівняння після класифікації. Виявлено, що за період 2002–2019 рр. забудована територія зросла на 5,61 %, площі лісів та полів зменшилися на 2,77 % та 2,36 % відповідно. Площа водних об'єктів зазнала найменших змін (+0,37 %). Оцінка якості проведених класифікацій продемонструвала, що класифікація, виконана на основі RGB знімків, є точнішою у порівнянні з класифікацією на основі вегетаційного індексу NDVI, за більшістю класів фільтрована класифікація показала точніші результати. Моніторинг змін земної поверхні задля збалансованого локального, регіонального та національного розвитку і планування територій є новим напрямком застосування даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) в Україні, що дозволяє оцінити наявний стан геокомпонентів системи та спрогнозувати їх подальші зміни. Вивчення антропогенної активності дозволяє передбачити небезпечні техногенні процеси і таким чином уникнути чи зменшити їх наслідки. Результати дослідження можуть використовуватись як основа для подальшого моніторингу регіону, а також бути корисними для територіальних громад з метою гармонійного, сталого розвитку та управління земельними ресурсами досліджуваної ділянки.

Ключові слова: дані дистанційного зондування Землі, моніторинг, антропогенна активність, контрольована класифікація, NDVI.

Вступ

Сучасні ландшафти та екологічно дестабілізоване середовище характеризуються аномально швидкими змінами структурної організації геокомпонентів, ландшафтних комплексів і їх взаємозв'язків. Антропоїзація географічної оболонки Землі і, особливо, її поверхні, загострилися за останні 150–170 років [Tarolli et al., 2016], та перетворила природне середовище до такої міри, що нову епоху називають антропоценом [Gaffney et al., 2017].

Нові види антропогенної діяльності викликали зміни в динаміці атмосфери, гідросфери, біосфери і геосфери, зокрема через зміни у взаємодії земних систем та зміни землекористування [Steffen et al.,

2015]. Сьогодні діяльність людини продовжує змінювати ландшафти через урбанізацію, подальший промисловий розвиток та розширення сільського господарства [Waters et al., 2014; Li-An et al., 2018].

Szabó, et al. (2010) стверджують, що сучасні ландшафтні дослідження створюють наукову основу для планування та регіонального розвитку. Автори [Chiesura et al., 2003; Pelenc et al., 2015] наголошують, що повна заміна природних ландшафтів антропогенними не може забезпечити збалансований регіональний чи національний розвиток і значно прискорить їх руйнування. Проводячи моніторинг змін земної поверхні, можна ефективно відслідковувати збільшення чи зменшення міри

антропогенного впливу на конкретну територію і враховувати ці дані для збалансованого планування місцевості.

Для моніторингу та виявлення геоморфологічних змін вже з 1970-х років активно використовуються дані ДЗЗ [Cracknell, 2018]. Дані ДЗЗ відображають об'єктивний стан процесів і явищ на поверхні Землі в певний момент часу, а регулярне повторення знімків дозволяє простежити їхню динаміку.

Розвиток апаратури знімання, розміщеної на космічних апаратах та штучних супутниках, відкрив нові можливості отримувати дані більш високої роздільної здатності, та значно покращив кінцеву якість даних ДЗЗ [Cracknell, 2018]. Сучасні дані ДЗЗ можуть конкурувати за точністю з даними, отриманими в результаті прямих польових досліджень.

Зважаючи на темпи ландшафтних перетворень, для їх моніторингу використовують дані зняті з великим часовим діапазоном. Під цю категорію підпадають дані космічного знімання Landsat [Gong, 2013].

Варто зазначити, що високоточні супутникові дані в більшості випадків є комерційними та дорогими, що робить регіональний та локальний моніторинг на їх основі неефективним.

Однак, дані середньої та низької роздільної здатності деякі космічні агентства, зокрема і дані супутників Landsat, надають у вільний доступ, що дозволяє проводити моніторинг на глобальному рівні, розробляти та оцінювати методики обробки, аналізу, застосування даних ДЗЗ як у наукових, так і в прикладних цілях [Бурштинська, Станкевич, 2010; Huan et al., 2019].

У публікації [Newton et al., 2009] наведена критична оцінка використання даних ДЗЗ в проблемах ландшафтно-екології, проведена на основі опрацювання 438 наукових праць за 2004–2008 рр. В результаті встановлено, що 36 % досліджень прямо згадують дистанційне зондування, при цьому майже у половині досліджень використано дані з супутників Landsat. Переважна більшість досліджень з використанням даних ДЗЗ – це дослідження картографічного напрямку. ДЗЗ стало важливим інструментом для вивчення просторової структури екосистем на глобальному рівні [Gergel, Turner, 2017]. Зазначається [Newton et al., 2009], що можливості ДЗЗ досі не повністю використовуються дослідниками ландшафтних змін, що відкриває подальші перспективи для розвитку співпраці між дослідниками ДЗЗ, геоінформаційних технологій та ландшафтознавцями.

Із поширенням використання даних ДЗЗ збігся стрімкий розвиток геоінформаційних технологій, які сьогодні стали невід'ємною частиною досліджень зі збору, обробки, аналізу, систематизації та збереження різних типів даних.

Сучасні геоінформаційні системи (ГІС) надають ефективні засоби вивчення, моделювання та візуалізації просторової структури та динаміки ландшафтів, особливо складних взаємозв'язків між

фізичними, біологічними та антропогенними процесами. У публікації [Huan et al., 2019] автори провели аналіз статей опублікованих в період 1990–2016 рр. на веб-сайті «Web of Science». Загальна кількість публікацій у сфері ГІС та ландшафтної геоморфології за вказаний період становить 365. Порівняно з 1990 роком у 2016 році кількість статей у зазначених галузях зросла в п'ять разів, що свідчить про високий інтерес, важливість, та актуальність цих досліджень.

У дослідженні [Ayele et al., 2018] подано оцінку динаміки зміни ґрунтового покриву землекористування регіону Північної Ефіопії між 1995 і 2014 роками за допомогою знімків Landsat. Авторами застосовано об'єктно-орієнтований алгоритм класифікації для аналізу супутникових знімків. Також використано вегетаційний індекс NDVI для попереднього виявлення змін типів земного покриву. Для детального аналізу динаміки просторово-часових змін апробовано метод контрольованої класифікації на основі об'єктів, який використовує байєсівський алгоритм машинного навчання. Стаття демонструє можливість та результативність використання даних Landsat для моніторингу змін поверхні великої території (18 772,78 км²), проте питання локального моніторингу змін складу категорій земель із використанням знімків Landsat залишається відкритим, як і точність проведених класифікацій.

Вивчення геоморфологічних процесів є одним із напрямків моніторингу змін навколишнього середовища [Li et al., 2016], і включає моніторинг техногенних об'єктів, як ділянок підвищеної небезпеки для довкілля за умови порушення встановлених правил їх функціонування чи консервації.

Дослідження [Thilagavathi et al., 2015] проводилось з метою моніторингу змін земного покриву регіону Салем, Південна Індія, що є місцем видобутку корисних копалин та налічує значну кількість шахт. Авторами використали три джерела даних: Landsat, IRS P6 LISS IV MX Image та топографічні карти (станом на 2002–2012 рр.). Методологія дослідження базувалась на використанні інструменту контрольованої класифікації знімків для отримання та фіксації змін покриву у просторі та часі. Варто зазначити, що у статті відсутня інформація про якість класифікації та точність отриманих результатів.

Публікація [Kolios et al., 2013] спрямована на дослідження зміни покриву прибережної зони Превеза, Північно-Західна Греція. Моніторинг за даними сцен Landsat проводився у період 2000–2009 рр. Авторами використано вегетаційні індекси (NDVI, EVI, RVI, SAVI, BI, CI) та комбінації смуг, а також методології класифікації зображень (метод паралелепіпеда, мінімальної відстані, відстані Махаланобіса, максимальної вірогідності, опорних векторів та штучних нейронних мереж). У висновках зазначено про можливість покращення результатів шляхом підвищення роздільної здатності вхідних даних та моніторингу на сезонній основі.

Проаналізовані публікації підтверджують актуальність проведення моніторингу змін складу категорій земель для подальшого аналізу антропогенного впливу на території. Демонструють можливість використання даних знімальної системи Enhanced Thematic Mapper (ETM+), розміщеної на супутниках Landsat, у дослідженнях просторово-часової динаміки зміни типів земної поверхні.

Підсумовуючи аналіз літературних джерел, необхідно спершу зазначити, що методи ДЗЗ займають в сучасних дослідженнях геоморфологічного аналізу превалюючу компоненту, а це дає можливість для розробки новітніх технологічних схем та апаратного забезпечення стосовно подальшого розвитку в цьому напрямку.

Мета

Дослідження проводилось з метою моніторингу змін складу категорій земель регіону м. Стебник з використанням даних ДЗЗ, а саме космічних знімків Landsat 7 та Landsat 8. Окрім цього, виникає необхідність корегування технологічної схеми: чи достатня кількісна та якісна інформація при застосуванні матеріалів цих супутників.

Методологія

У дослідженні використано дані ДЗЗ, що знаходяться у вільному доступі: ETM+, сцени Landsat 7 та Landsat 8 станом на 2002 та 2019 роки відповідно.

Для досягнення поставленої мети застосовано класифікацію космічних знімків, як один із поширених методів аналізу даних ДЗЗ [Dhingra et al., 2019]. Метою класифікації зображень є упорядкування окремих пікселів, які сформували зображення, у групи на основі типу земного покриття, який вони репрезентують.

Процес класифікації ґрунтувався на категоріюванні кожного з пікселів, що знаходяться в межах відзнятої сцени, до відповідного класу. Кожному пікселю мультиспектрального зображення відповідає набір значень спектральних характеристик, або вектор в спектральному просторі, розмірність якого дорівнює повній кількості зональних зображень у складі мультиспектрального знімка.

Отже, процес класифікації зводиться до розподілу за певним алгоритмом всіх пікселів за класами відповідно до відбивної здатності (значенням спектральної яскравості) кожного об'єкта в одній або декількох зонах електромагнітного спектра [Riese et al., 2019].

У дослідженні використано метод контрольованої класифікації за принципом максимальної вірогідності з оптимальним підбором навчальних вибірок для досягнення мети роботи. Процес класифікації поділявся на такі основні етапи: планування класифікації; вибір опорних ділянок (формування кластерів); процес класифікації; оцінка якості класифікації та реєстрація результатів; оцінка точності проведеної класифікації.

При застосуванні методів класифікації існує пряма залежність між точністю отриманих результатів та просторовою розрізненістю вхідних матеріалів, адже класи формуються на основі піксельних даних (що вища роздільна здатність пікселя то більшу кількість об'єктів на місцевості можна ідентифікувати з кращою точністю).

Для забезпечення якості класифікації важливо проаналізувати регіон дослідження, його геоморфологічні особливості та наявні типи землекористування для формування відповідних класів та вибірок.

Одним із методів покращення якості отриманих класифікацій є фільтрація растрових зображень. Відповідно до результатів підбирається оптимальний фільтр та аналізується вплив фільтрації на якість класифікації (наприклад шляхом обрахунку впливу фільтрації на зміну площ виділених категорій земель).

Беручи до уваги проаналізовані джерела [Kolios et al., 2013; Ayele et al., 2018], для розширеного аналізу змін складу категорій земель території доцільно застосовувати вегетаційні індекси (вегетаційний індекс необхідно підбирати, зважаючи на властивості та характеристики поверхні регіону дослідження). У результаті можливий порівняльний аналіз якості визначення площ класів на основі різних даних.

Геоморфологічний аналіз досліджуваного регіону

Стебник – місто в Дрогобицько-Бориславському районі Львівської області, окрема одиниця Карпатської агломерації, Україна. Регіон дослідження поширюється на змішано-лісові передгірні та лучно-галькові гірські й передгірські ділянки, оточені хвойно-листяними низовинами. Регіон дослідження включає найбільше родовище калійної солі в Україні, розташоване на території Бориславсько-Покутського геологічного покриття.

Родовище відкрите в 1834 році. Його хімічний склад належить до солей сульфатного типу, характеризується складними та унікальними мінералами солей і надзвичайно високим вмістом глинистого матеріалу. Серед калійно-магнієвих солей найбільше поширення мають лангбейніт і каїніт, підрядне значення мають карналіт та сильвін. Значно рідше – шеніт, полігаліт, епсоміт, леоніт, астраханіт, кізерит, ангідрит, зрідка – левейт, вантгофіт, сингеніт та ін. Також галіт є невід'ємною частиною всіх калійно-соляних порід [Дяків та ін., 2019; Снітинський та ін., 2021].

Територія гірничого відводу являє собою родовище з урізами долин невеликих річок і яружно-балковою мережею [Готинян, Томченко, 2009].

Родовища калійної солі в Стебнику розроблялися двома підземними шахтами загальною виробничою потужністю 4 млн тонн на рік. Система розробки – підповерховими ортами з виробленням камер завширшки 15–42 м, заввишки 60–120 м і завдовжки до 100 м. Вироблений простір підтри-

мували шляхом залишення міжкамерних і міжповерхових стовпів шириною 12–24 м [Рудько, Бондаренко, 2001].

Видобуток калійних солей, за початковими проектами, здійснювався без закладки відпрацьованих порожнин, в результаті чого утворилися пустоти близько 33 млн м³, що призвело до осідання земної поверхні та утворення провалів [Рудько, Бондаренко, 2001; Чепурна, Самборська, 2017].

Загальний об'єм підземних карстових порожнин становить 440 тис. м³, що несе значну небезпеку та створює перспективи техногенної катастрофи. Збільшення надходження води в шахти посилює утворення карстових пустот, представлених порами вилуговування, тріщинами, змивами, кавернами, воронками, камерами. Карстові явища порушують цілісність функціонуючих споруд, будівель та інженерних комунікацій. Розробка родовища спричинила прогин поверхні [Savchyn et al., 2019; Zaiats et al., 2017], підземне та поверхнєве карстоутворення, кількість та інтенсивність якого, незважаючи на припинення видобутку, через складні гідрогеологічні умови з часом зростає [Чепурна, Самборська, 2017].

У вересні 2017 р. на території Стебницького родовища стався карстовий провал воронка якого досягала 220–230 м у діаметрі, а глибина 45–47 м (див. рис. 1). Вийшла з ладу ЛЕП 220, опори якої опинились у воронці, та водогін, що постачав воду до міста Дрогобич [Дяків, та ін., 2019; Zaiats et al., 2017].

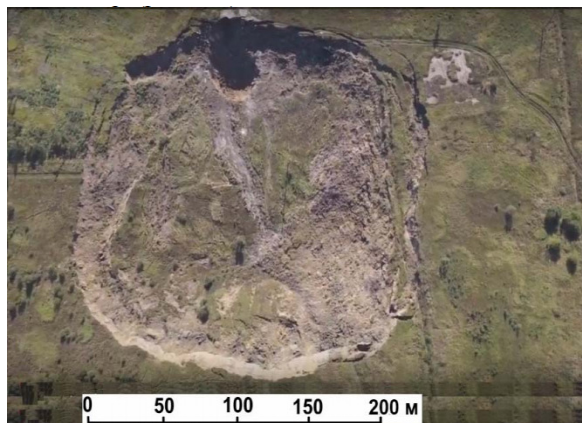


Рис. 1. Форма та розміри зсуву, що стався 30 вересня 2017 року на шахті № 2 [Дяків, та ін., 2019]

Провалля розташоване у районі автодороги Пісочне–Східниця – основної автомагістралі у напрямку курорту державного значення Трускавець. Від автодороги до карстового провалу близько 300 м, а соляний пласт та видобувні камери пролягають під автошляхом [Kuzmenko et al., 2019]. Місце зсуву й надалі продовжує деформуватись, подальший розвиток провалля з утворенням карстового озера зображено на рис. 2.



Рис. 2. Фрагмент знімка місця провалів зробленого з БПЛА “Агров” у квітні 2020 р.

У досліджуваному регіоні міста Стебник (рис. 3) діяльність людини спричинила такі ландшафтні та геоморфологічні зміни, які вже зараз є загрозливими для мешканців. Зсуви, що виникли на території, свідчать про недотримання норм видобутку калійних солей та нехтування екологічними засадами консервації шахт після їх закриття. Це може призвести до зсувів на інших ділянках шахт, де розташовані житлові будинки, автомагістралі, об'єкти гідро-, та електропостачання [Savchyn et al., 2019; Zaiats et al., 2017], що свідчить про небезпечну техногенну активність в регіоні, яка загрожує населенню та інфраструктурі.

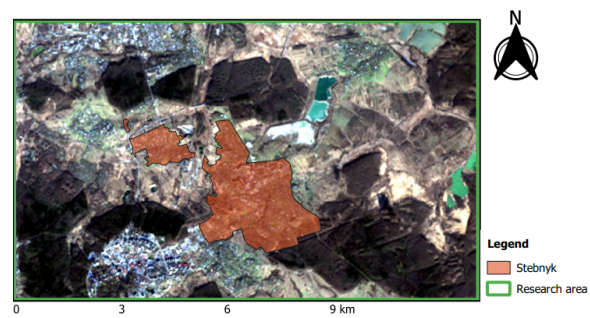


Рис. 3. Досліджуваний регіон з адміністративними межами м. Стебник на RGB знімку Landsat 8 (грудень 2019)

Результати

Класифікація виконана в програмному забезпеченні QGIS за допомогою плагіна SACP на основі мультиспектральних космічних знімків Landsat 7 (знімок станом на лютий 2002 року) та Landsat 8 (знімок станом на грудень 2019 року). Для можливості використання знімків, як основи класифікації, N-розрядні цифрові числа перетворені в значення коефіцієнта відбиття, виконано процедуру радіометричної корекції сенсорних і атмосферних ефектів. Для підвищення якості класифікації виконано процедуру паншарпенінгу і підвищено роздільну здатність пікселя до 15 м.

Після дешифрування та аналізу досліджуваної території прийняте первинне рішення про класи-

фікацію досліджуваного регіону за 4 класами (забудована територія; ліси; водні об'єкти; поля).

Процес класифікації базувався на вибраних групах пікселів (навчальних вибірках або кластерах), що характеризували типові ділянки для кожного класу. Результати контрольованої класифікації RGB знімків наведені на рис. 4.

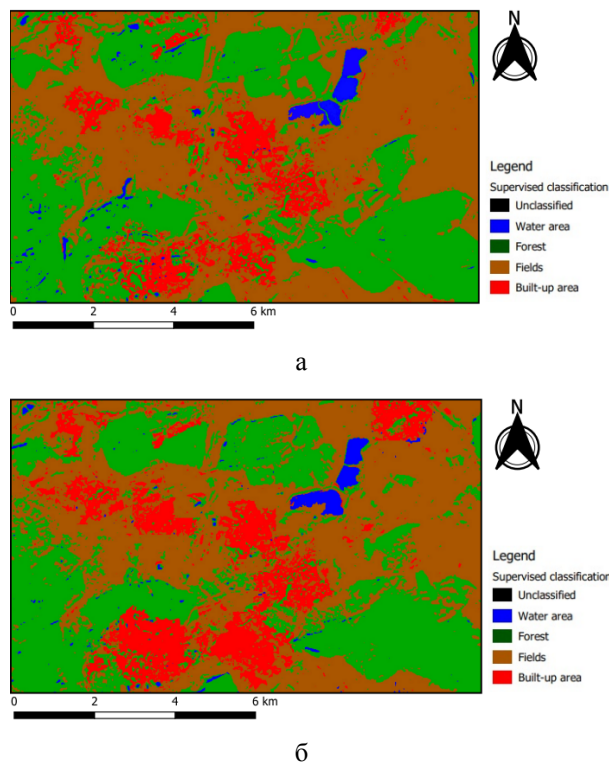


Рис. 4. Результат контрольованої класифікації на основі RGB знімків території м. Стебник: а – класифікація проведена на основі знімку Landsat 7, 2002 рік; б – класифікація проведена на основі знімку Landsat 8, 2019 рік

На рис. 4 зелений колір – лісові площі; синій – водні об'єкти; червоний – забудована територія та коричневий – ділянки поля.

При візуальному аналізі якості класифікацій виявлено коректно ідентифіковані лісові площі, класифікація водних об'єктів та забудованої території дещо неоднозначна. Через ширину річок та водотоків, що протікають в зоні дослідження (в середньому 2 м), неможливо було ідентифікувати окремі пікселі річкової мережі, тому алгоритм класифікації пікселів річки не виявив. Результати класифікації відобразили деякі водні об'єкти на ділянках, які не покриті водою, але не можна стверджувати однозначно, що це некоректно, оскільки, можлива підвищена вологість ґрунту (болотиста місцевість) на цій території, що важко виявити під час дешифрування знімків. Досліджуваний об'єкт характеризується замиським типом забудови (будинки розміщені нещільно, оточені подвір'ями, садом, городами; низький відсоток багатоповерхової забудови), як наслідок площа, що займає забудована ділянка на пікселі менша за площу інших класів (здебільшого полів).

За візуальним аналізом класифікацій при порівнянні результатів 2002 та 2019 років помітне збільшення забудованої площі, збільшення неоднорідності полів та лісових площ. Виявлено, що класифікація на основі знімку Landsat 8 виконана якісніше від класифікації знімку Landsat 7 (є менше малих груп пікселів, які не відображають реальні характеристики території). Це пов'язано з покращеними характеристиками апаратури знімання. Класифікований растр оцінено не лише візуально, але й математично на основі автоматичного підрахунку кількості пікселів, що потрапили до кожного з класів. Визначено площу класів і проведено аналіз динаміки зміни площ окремих категорій земель. Отримані дані зображено у вигляді діаграми на рис. 5.

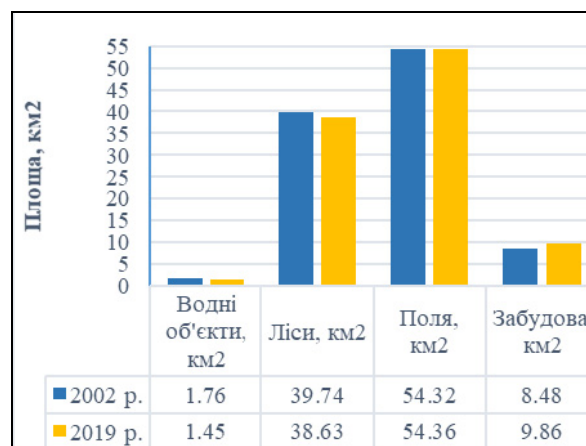


Рис. 5. Діаграма змін площі категорій земель регіону м. Стебник за період 2002–2019 рр. (за даними нефільтрованих класифікацій)

Як видно з діаграми, за 17 років площа забудованої території збільшилась значною мірою за рахунок зменшення площі лісів. Площа водних об'єктів істотно не змінилась. Площа полів залишилась практично незмінною.

Для покращення якості класифікації застосовано фільтрацію (фільтр більшості). Встановлено пошук пікселів, які не межують з пікселями одного класу (умова: піксель одного класу межує з 4 пікселями того ж класу, якщо межує з 3 або менше, такий піксель фільтрується, а растрова комірка заповнюється класом пікселів, які найбільше межують з нею). Відфільтровано окремі пікселі, які можна вважати випадковими. Результати фільтрації наведені на рис. 6. та рис. 7.

Зменшено кількість випадкових пікселів, що некоректно характеризували ділянки місцевості. Класифікація забудованої території стала більш щільною, території полів та лісів стали одноріднішими. Для аналізу впливу фільтрації на площу різних класів обраховано звіти про класифікації. Візуалізація результатів порівняння площ класів за нефільтрованими та фільтрованими класифікаціями зображена у вигляді діаграми на рис. 8.

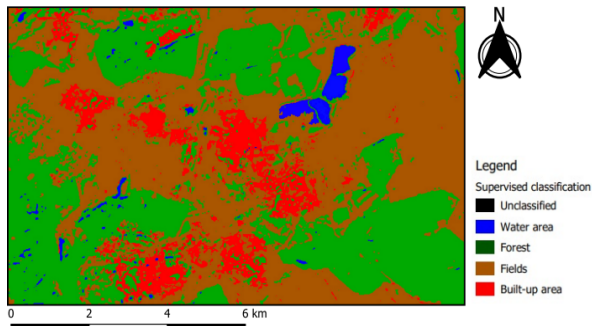


Рис. 6. Результат застосування фільтру більшості на основі проведеної класифікації знімка Landsat 7 (2002 р.)

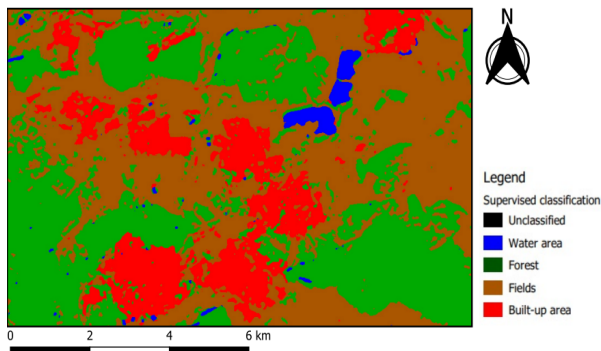


Рис. 7. Результат застосування фільтру більшості на основі проведеної класифікації знімка Landsat 8 (2019 р.)

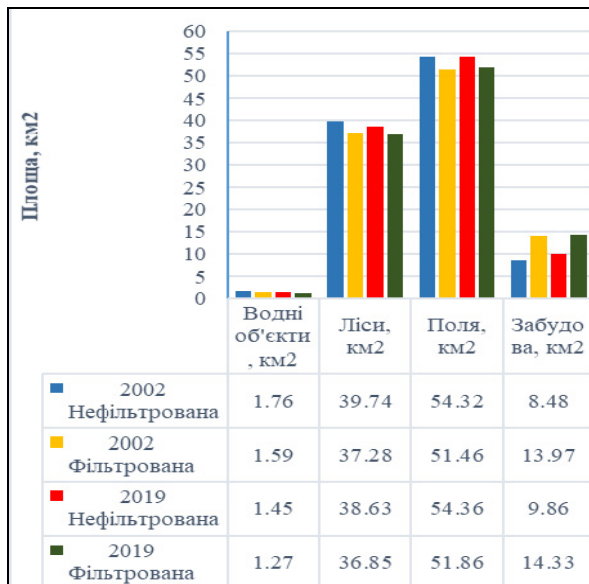


Рис. 8. Порівняння площ, розрахованих за даними фільтрованої та нефільтрованої класифікацій

Зважаючи на характеристики досліджуваної ділянки (значна територія вкрита лісовими площами та полями), застосовано вегетаційний нормалізований індекс різниці рослинності для проведення на його основі класифікації, аналізу та порівняння просторово-часової динаміки зміни типів земного покриття.

Індексом називають різницю між смугами зображень, що обчислюють з метою створення нового шару для виокремлення певних атрибутів [Coops, Tooke, 2017]. Нормалізований індекс різниці рослинності (NDVI) є поширеним індексом у дистанційному зондуванні і є комбінацією коефіцієнта відбиття поверхні на двох довжинах хвиль і більше, яка використовується для підкреслення особливої властивості рослинності [Hatfield, Moran, 2014]. Цей індекс використовує різницю між ближньою інфрачервоною областю спектра (де рослинність демонструє високу відбивну здатність) і червоною областю (де рослинність має дуже низьку відбивну здатність). Обчислюється за формулою [Tucker, 1979]:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

де *NIR* – амплітуда відбиття в ближній інфрачервоній області спектра; *RED* – амплітуда відбиття в червоній області спектра.

Відповідно до формули (1), щільність рослинності (*NDVI*) у певний момент зображення дорівнює різниці між інтенсивністю відбитого світла в інфрачервоній та червоній зонах, поділений на суму їх інтенсивності.

Для відображення індексу *NDVI*, значення якого є в межах від -1,0 до +1,0 використовується стандартизована безперервна дискретна шкала. Відповідно до цієї шкали природні об'єкти, не пов'язані з рослинністю, мають постійне значення *NDVI* (яке можна використовувати для визначення цього параметра) [Hatfield, Moran, 2014]. У табл. 1 наведено шкалу *NDVI*, де кожному значенню відповідає певний тип об'єктів земної поверхні.

Таблиця 1

Характеристика шкали значень *NDVI*

Значення <i>NDVI</i>	Тип земної поверхні
-0,50	Штучні матеріали (бетон, асфальт)
-0,25	Вода
-0,05	Сніг та лід
0,00	Хмари
0,03	Рілля
0,50	Розріджена рослинність
0,70	Густа рослинність

На рис. 9. та рис. 10. подано результат обчислення вегетаційного індексу *NDVI* для досліджуваної території.

Характерним є відображення хвостосховища, що інтерпретується на знімку RGB як об'єкт, покритий водою, проте із застосуванням індексу *NDVI*, без попереднього ретроспективного вивчення регіону дослідження, очевидним є непри-

родній хімічний склад, що не притаманний водоймищам. Зважаючи на датування використаних мультиспектральних даних (міжвегетаційний період), а також видовий склад лісів регіону (не хвойні насадження), густа рослинність не інтерпретується.

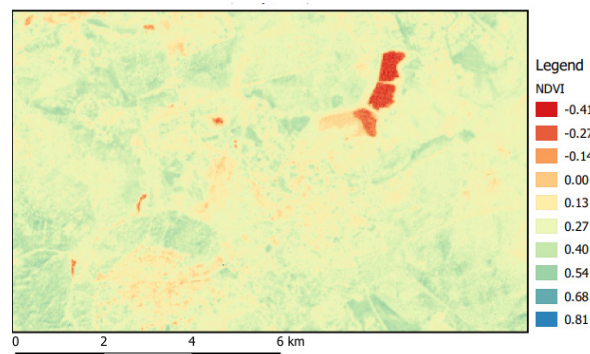


Рис. 9. Результат обрахунку вегетаційного індексу NDVI на основі знімка Landsat 7 (2002 р.)

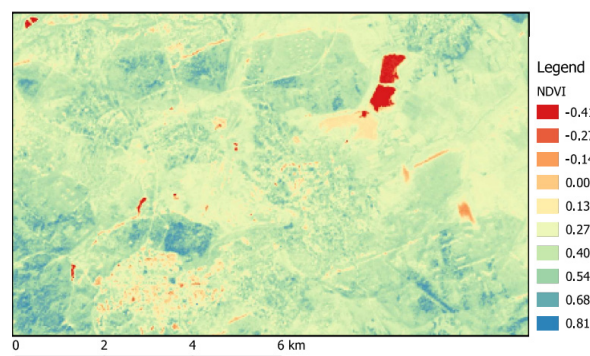
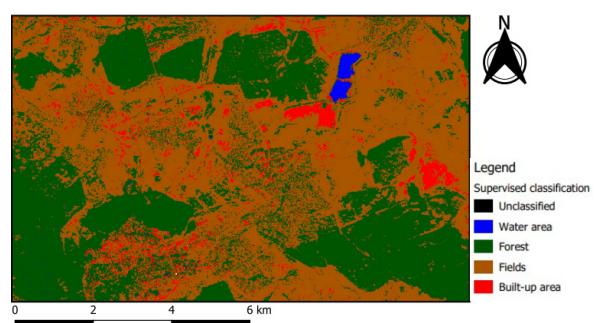


Рис. 10. Результат обрахунку вегетаційного індексу NDVI на основі знімка Landsat 8 (2019 р.)

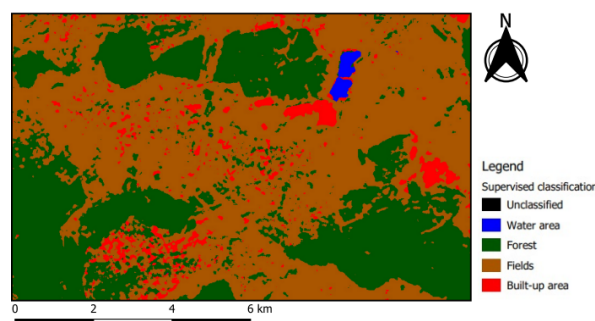
На основі карт вегетаційних індексів проведено контрольовану класифікацію. Аналогічно до вище наведеного прикладу фільтрації зображень застосовано фільтр більшості. Результати нефільтрованої та фільтрованої класифікацій на основі обрахованих вегетаційних індексів *NDVI* подано на рис. 11. та рис. 12. відповідно.

Для аналізу зміни складу категорій земель регіону за даними класифікацій, проведених на основі вегетаційного індексу *NDVI*, обраховано площі кожного з класів, результати наведено у вигляді стовпчикової діаграми на рис. 13.

Наступним етапом після процесу класифікації є оцінка її точності, що дає змогу виявити та виміряти помилки. Як правило, оцінка точності класифікації виконується шляхом обчислення матриці похибок. Матриця похибок представляє порівняльну таблицю даних класифікації з еталонними даними для визначеної кількості вибірових ділянок.



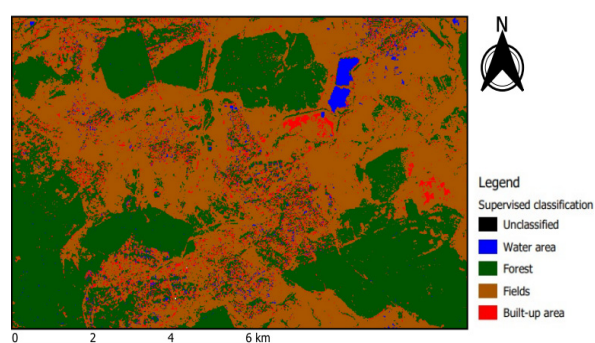
а



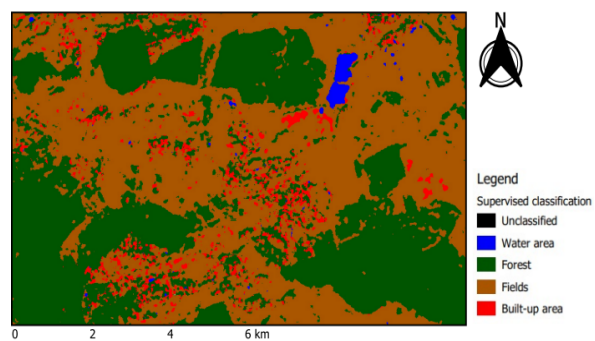
б

Рис. 11. Результат контрольованої класифікації проведеної на основі *NDVI* станом на 2002 р.:

а – нефільтрована класифікація; б – фільтрована класифікація



а



б

Рис. 12. Результат контрольованої класифікації, проведеної на основі *NDVI* станом на 2019 р.:

а – нефільтрована класифікація; б – фільтрована класифікація

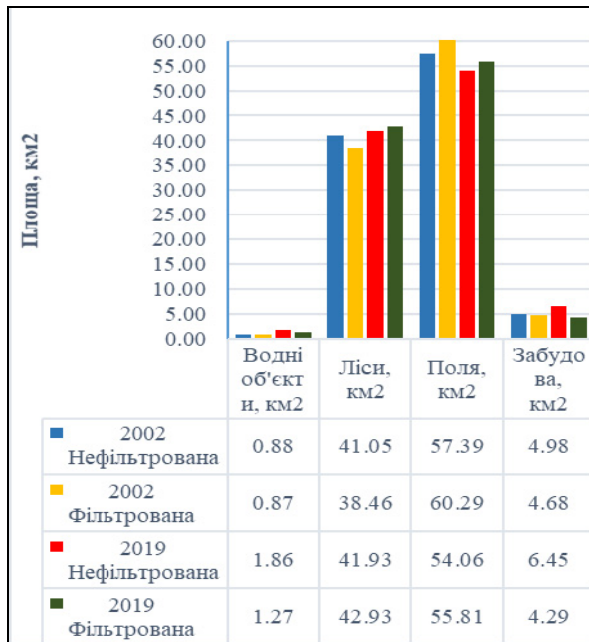


Рис. 13. Розподіл площ класів фільтрованої та нефільтрованої класифікацій станом на 2002 та 2019 рр. на основі обрахованих даних вегетаційного індексу *NDVI*

Результати обрахунків приведено у Таблиці 2.

Достовірність проведених класифікацій RGB знімків та даних вегетаційного індексу *NDVI* оцінювалась за формулою (2) [Shalan et al., 2004]:

$$P_{overall} = \frac{\sum_{i=1}^n n_{ii}}{N} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

де $P_{overall}$ – загальна, або ж повна точність класифікації,
 n – кількість класів,
 n_{ii} – кількість правильно класифікованих пікселів у класі,
 N – загальна кількість пікселів.

Для покращення визначення точності класифікації також обраховують індекс Каппа (3) [Shalan et al., 2004].

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij} - \sum_{i=1}^n (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^n (x_{i+} \times x_{+i})}, \quad (3)$$

де n – кількість лінійок, стовпців в матриці похибок,
 N – загальна кількість пікселів в матриці похибок,
 x_{ij} – елемент великої діагоналі для класу i ,
 x_{i+} – загальна кількість пікселів лінійці i ,
 x_{+i} – загальна кількість пікселів стовпці i .

Таблиця 2

Оцінка точності проведених класифікацій

Типи категорій земель	На основі RGB знімка							
	2002				2019			
	Нефільтрована класифікація		Фільтрована класифікація		Нефільтрована класифікація		Фільтрована класифікація	
	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа
Водні об'єкти	63,57	0,56	66,74	0,59	77,60	0,71	88,45	0,85
Ліси	89,40	0,87	84,37	0,81	85,06	0,82	89,89	0,87
Поля	87,30	0,84	87,29	0,84	81,71	0,79	83,69	0,80
Забудована територія	68,71	0,60	60,33	0,53	61,01	0,54	78,68	0,72
Типи категорій земель	На основі обрахованого вегетаційного індексу <i>NDVI</i>							
	2002				2019			
	Нефільтрована класифікація		Фільтрована класифікація		Нефільтрована класифікація		Фільтрована класифікація	
	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа	Загальна точність, %	Коефіцієнт Каппа
Водні об'єкти	68,41	0,60	67,43	0,59	51,03	0,45	78,47	0,71
Ліси	86,08	0,83	87,37	0,84	76,08	0,69	73,38	0,67
Поля	81,50	0,78	76,02	0,69	72,30	0,66	68,82	0,61
Забудована територія	46,21	0,41	43,46	0,38	39,92	0,35	26,57	0,23

Висновки

Антропогенна діяльність значно прискорила темпи геоморфологічних змін ландшафтів, що впливають на усі процеси в геосфері та несуть у собі потенційну небезпеку на регіональному, локальному та глобальному рівнях. Отже, моніторинг просторово-часової динаміки зміни складу категорій земель дозволяє виявити та спрогнозувати розвиток таких процесів, як ерозія, зсув, просідання, карстоутворення та ін.

У дослідженні представлено моніторинг змін земного покриву техногенно небезпечного регіону міста Стебник (Україна) в період з 2002 по 2019 роки. Розглянуто можливість використання вільнодоступних даних ЕТМ+ для виявлення регіональних змін складу категорій земель на ділянці площею 104,31 км². Територія поділена на 4 класи (водні об'єкти, лісові площі, поля та забудована територія) для проведення контрольованої класифікації за методом максимальної вірогідності. Також проаналізовано зміни на основі вегетаційного індексу NDVI.

Наведено інформацію про зміни площ класів, зважаючи на оцінку точності класифікацій. Порівняно дані класифікацій 2002 та 2019 рр. відповідно до їх якості. Найбільших змін зазнала забудована територія, площа якої зросла на 5,61 % внаслідок, доволі однорідного, зменшення площ лісів (2,77 %) та полів (2,36 %). Площа водних об'єктів зросла на 0,37 %.

Варто зазначити, що якість класифікації водних об'єктів та забудованої території є на порядок нижчою від якості класифікації площ лісів та полів. Це зумовлено особливостями регіону дослідження, а саме нещільною забудовою, відсутністю багатосмугової, розвиненої дорожньої мережі. Щодо водних площ, то характерним об'єктом, що добре класифікується на знімку, є хвостосховище, інших великих водних об'єктів на території немає, ширина долини річок у більшості не перевищує двох метрів, що унеможливило їх виявлення на знімку.

Отримані результати забезпечують важливу основу моніторингу для подальших досліджень ландшафтних змін території, підтверджують актуальність антропогенних процесів регіону, відображають динаміку зміни типів землекористування в просторово-часовому діапазоні.

Оцінка точності та аналіз проведеного моніторингу демонструє можливість використання даних ЕТМ+ та знімків Landsat для апробації методики виявлення змін типів землекористування на регіональному рівні, проте недостатня роздільна здатність не дозволяє вивчати геоморфологічні процеси та ідентифікувати небезпечні техногенні ділянки (карстоутворення, просідання, зсув поверхні) на досліджуваній території. Тому, в подальших дослідженнях планується застосовувати матеріали знімання з безпілотних літальних апаратів, як оптимального методу отримання інформації для вивчення геоморфологічних змін території дослідження.

Список літератури

- Бурштинська Х. В., Станкевич С. А. Аерокосмічні знімальні системи: навч. посіб. *Львів: Львівська політехніка*, 2010.
- Готинян В. С., Томченко О. В. Оцінка тенденцій прояву карстових процесів за матеріалами ДЗЗ (на прикладі Стебницького родовища калійних солей). *Вісник геодезії та картографії*, 2009, (5), 24–27.
- Дяків В., Гевпа З., Ковальчук М. Геоecологічні характеристики та гідрохімічний склад водних шарів карстового озера, утвореного на ділянці провалу № 27 над шахтою № 2 Стебник заводу "Полімінерал". Державна комісія України із запасів корисних копалин. 2019. С. 215–221.
- Рудько Г., Бондаренко М. Техногенна екологічна безпека територій соляних і сірчаних родовищ Львівщини.. *Праці Наукового товариства ім. Шевченка*. 2001. № 40. Вип. 7. С. 68–75. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/73450>.
- Снітинський В., Зеліско О., Хірівський П., Мазурак О., Кректун Б., Корінець Ю. Гідрогеологічний моніторинг території Стебницького родовища калійних руд Дрогобицького району Львівської області. *Вісник Львівського Національного Аграрного університету. Розділ Екологія*. 2021. С. 5–8. <https://doi.org/10.31734/agronomy2021.01.005>.
- Чепурна Т. Б., Самборська О. І. Неромережеве моделювання динаміки просідань на території СГХП ПАТ "Полімінерал". 2017. <http://elar.nung.edu.ua/bitstream/123456789/8891/1/8600p.pdf>.
- Ayele G. T., Tebeje A. K., Demissie S. S., Belete M. A., Jemberrie M. A., Teshome W. M., Mengistu D. T., Teshale E. Z. Time Series Land Cover Mapping and Change Detection Analysis Using Geographic Information System and Remote Sensing, Northern Ethiopia. *Air, Soil and Water Research*. 2018. <https://doi.org/10.1177/1178622117751603>.
- Chiesura A., De Groot R. Critical natural capital: a socio-cultural perspective. *Ecological Economics*. 2003. No. 2–3. Vol. 44. P. 219–231. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(02\)00275-6](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(02)00275-6).
- Coops N. C., Tooke T.R. Introduction to Remote Sensing. *Learning Landscape Ecology*. Springer. 2017. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6374-4_1.
- Cracknell A. P. The development of remote sensing in the last 40 years, *International Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 39:23. P. 8387–8427. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1550919>.
- Dhingra S., Kumar D. A review of remotely sensed satellite image classification. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2019. No. 3. Vol. 9. P. 1720–1731. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i3>.
- Gaffney O., Steffen W. The Anthropocene equation. *The Anthropocene Review*. 2017. No. 1. Vol. 4. P. 53–61. <https://doi.org/10.1177/2053019616688022>.

- Gergel S. E., Turner M. G. (Eds.). Learning Landscape Ecology. 2017. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-6374-4>.
- Gong P., Wang J., Yu L., Zhao Y., Zhao Y., Liang L. ... & Chen J. (2013). Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7), 2607–2654. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.748992>.
- Hatfield J., Moran S. Agriculture and Remote Sensing. Encyclopedia of Remote Sensing. 2014. https://doi.org/10.1007/978-0-387-36699-9_6.
- Huan Y., Xiangmeng L., Bo K., Ruopu L., Guangxing W. Landscape ecology development supported by geospatial technologies: A review, Ecological Informatics. 2019. Vol. 51. P. 185–192. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2019.03.006>.
- Kolios S., Stylios C. D. (2013). Identification of land cover/land use changes in the greater area of the Preveza peninsula in Greece using Landsat satellite data. *Applied Geography*. Vol. 40. P.150–160. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.02.005>.
- Kuzmenko E. D., Maksymchuk V. Yu., Bagriy S. M., Sapuzhak O. Ya., Chepurnyi I. V., Deshchytsya S. A., Dzoba U. O. Integration of electric prospecting methods for forecasting the subsidence and sinkholes within the salt deposits in the Precarpathian area. *Geodynamics*. 2019. No. 27. Vol. 2. P. 54–65.
- Li J., Yang L., Pu R., Liu Y. A review on anthropogenic geomorphology. *Journal of Geographical Sciences*. 2016. Vol. 27. P. 109–128. <https://doi.org/10.1007/s11442-017-1367-7>.
- Li-An C., Billa L., Azari M. Anthropocene climate and landscape change that increases flood disasters. *Int J Hydro*. 2018 No. 4. Vol. 2. P. 487–491. <https://doi.org/10.15406/ijh.2018.02.00115>.
- Newton A., Hill R., Echeverría C., Golicher D., Rey Benayas J., Cayuela L., Hinsley S. Remote sensing and the future of landscape ecology. *Progress in Physical Geography*. 2009. No. 4. Vol. 33. P. 528–546. <https://doi.org/10.1177/0309133309346882>.
- Pelenc J., Ballet J. Strong sustainability, critical natural capital and the capability approach. *Ecological Economics*. 2015. Vol. 112. P. 36–44.
- Riese F. M., Keller S., Hinz S. Supervised and Semi-Supervised Self-Organizing Maps for Regression and Classification Focusing on Hyperspectral Data. *Remote Sensing*. 2019. No. 1. Vol. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12010007>.
- Savchyn I., Tretyak K., Petrov S., Zaiats O. Brusak I. Monitoring of mine fields at Stebnyk potassium deposit area by a geodetic and geotechnical method. *European Association of Geoscientists & Engineers*. 2019. Vol. 1. P. 1–5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201902169>.
- Shalan M. A., Arora M. K., Elgy J. CASCAM: Crisp and Soft Classification Accuracy Measurement Software. 2004. URL: http://www.geocomputation.org/2003/Papers/Shalan_Paper.pdf.
- Steffen W., Broadgate W., Deutsch L., Gaffney O., Ludwig C. The trajectory of the Anthropocene: the great acceleration. *The Anthropocene Review*. 2015. Vol. 2(1), P. 81–98. <https://doi.org/10.1177/2053019614564785>.
- Szabó J., Dávid L., Lóczy D. Anthropogenic geomorphology: a guide to manmade landforms. Hungary: *Springer Science Business Media*. 2010. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3058-0>.
- Tarolli P., Sofia G. Human topographic signatures and derived geomorphic processes across landscapes. *Geomorphology*. 2016. Vol. 255. P. 140–161. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.007>.
- Thilagavathi N., Subramani T., Suresh M. Land use/land cover change detection analysis in Salem chalk hills, South India using remote sensing and GIS. *Disaster Adv*. 2015. Vol. 8. P. 44–52. <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1178622117751603>.
- Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*. 1979. No. 2. Vol. 8. P. 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- Waters C., Zalasiewicz J., Williams M., Ellis M., Snelling A. A stratigraphical basis for the Anthropocene? Special Publications. 2014. Vol. 395. P. 1–21. <https://pubs.geoscienceworld.org/gsl/books/book/1761/A-Stratigraphical-Basis-for-the-Anthropocene>.
- Zaiats O., Navodych M., Petrov S., Tretyak K. Precise tilt measurements for monitoring of mine fields at Stebnyk potassium deposit area. *Geodynamics*. 2017. No. 23. Vol. 2. P. 25–33. <https://doi.org/10.23939/jgd2017.02.025>.

Volodymyr HLOTOV¹, Myroslava BIALA²

^{1,2} Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: ¹ volodymyr.m.hlotov@lpnu.ua, ² myroslava.s.biala@lpnu.ua, ¹<https://orcid.org/0000-0002-1779-763X>

SPATIAL-TEMPORAL GEODYNAMICS MONITORING OF LAND USE AND LAND COVER CHANGES IN STEBNYK, UKRAINE BASED ON EARTH REMOTE SENSING DATA

The article presents the analysis and monitoring of land-use/land cover (LULC) changes considering the case study of Stebnyk, Lviv region, Ukraine, as an area of increased anthropogenic hazard impact (characterized by the karst sinkholes creation which is the result of extracting the potassium salt from underground mines and the violation of their conservation). The extraction was carried out without backfilling the underground excavations, resulting in the formation of voids of about 33 million m³ lying under the residential sector and road infrastructure, and could potentially be the site of future landslides/sinkholes that threaten the inhabitants and landscape ecosystem of the region as a whole. The research is based on Landsat 7 and 8 satellite images (made in February 2002 and December 2019, respectively), and ETM+ (Enhanced Thematic Mapper) data. Supervised classification conducted by maximum likelihood method was used to identify and analyze the spatial and temporal LULC changes on the territory divided into four classes. Vegetation indexes NDVI have been calculated, analyzed and featured for further supervised classification. The accuracy of the obtained data had been improved by raster image filtering. A post-classification comparison approach was used to analyze LULC changes over the research period. It was established that for the period 2002–2019 the built-up area has increased by 5.61 %, and the areas of forests and fields have decreased by 2.77 % and 2.36 %, respectively. The area of water bodies has undergone the least changes (+0.37 %). The estimation of accuracy of carried out classifications showed that the classification based on RGB images is more accurate than the classification based on the NDVI; the filtered classification showed more accurate results for most classes, than unfiltered one. LULC monitoring for balanced regional, local and national development, as well as territorial planning, is a new area of the application of Earth remote sensing (ERS) data in Ukraine. It allows assessing the state of the system geocomponents and predicting their further changes. The study of anthropogenic activity makes it possible to predict dangerous technogenic processes and thus avoid or reduce their consequences. The results of the research can be used as a basis for further monitoring of the Stebnyk region, as well as will be useful to territorial communities for harmonious, sustainable development and land management of the studied area.

Key words: Earth remote sensing data; monitoring, anthropogenic activity, supervised image classification, NDVI.

Надійшла 12.02.2022 р.