

УДК 528.46:711.14

Х. БУРШТИНСЬКА, Я. ДЕКАЛЮК

Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. Карпінського, 6/622, Львів, 79013, Україна, тел. +380672561130, ел. пошта: bursht@polynet.lviv.ua; orcid 0000-0002-6013-0873

МОНІТОРИНГ ХВОЙНИХ ЛІСІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ (на прикладі Тухлянського лісгоспу)

Метою роботи є розгляд стану хвойних лісів Тухлянського лісгоспу Прикарпатського регіону. Зміни земельного покриття, забруднення повітря, води та ґрунтів, погіршення їх якості, втрати біологічного різноманіття лісових екосистем відбуваються на регіональному та глобальному рівнях. Зміни клімату, підвищення температури та зменшення кількості опадів провокують розвиток шкідників, що найпоширеніші саме в хвойних лісах. Технології дистанційного зондування дають змогу створювати системи моніторингу лісів, зокрема визначення структури насаджень, виявлення змін у лісах через вплив пожеж, вирубок, екологічних проблем, зокрема засихання лісів. **Методика** виявлення змін у лісах ґрунтується на використанні космічних зображень високого просторового розрізнення, а для ідентифікації здорової, засохлої й частково пошкодженої засиханням хвойної рослинності на тестових ділянках – на опрацюванні знімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів. **Результатом** дослідження є зображення, отримане методом контрольованої класифікації. Точність класифікації залежить від правильного вибору сигнатур, для чого і слугують знімки з БПЛА. **Наукова новизна та практична значущість.** Запропоновано методику для ідентифікації різних станів хвойних лісів із використанням методу контрольованої класифікації за алгоритмом максимальної вірогідності. Принциповим для виконання завдання є вибір сигнатур класів. Методика може бути застосована у різних структурах лісового господарства.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі; методи класифікації зображень; сигнатури; космічні зображення; знімки із безпілотних літальних апаратів.

Вступ

Ліси – основні осередки збереження біорозмаїття, вони сприяють формуванню мікроклімату, стабільного гідрологічного режиму, захищають антропогенно змінені ландшафти від несприятливих природних та техногенних чинників. Ліси є одним із найважливіших та найефективніших засобів стабілізації різноманітних природних процесів. Лісові масиви виконують переважно водоохоронні, захисні, санітарно-гігієнічні, оздоровчі функції, а також забезпечують потреби суспільства в лісових ресурсах. Але, незважаючи на ці корисні функції, відбувається негативна антропогенна зміна лісів, що призводить до значних втрат лісових деревостанів.

Для забезпечення належного стану лісового фонду в Україні прийнято такі нормативні документи: Постанову Кабінету Міністрів України “Про затвердження санітарних правил в лісах України” (1995 р., ред. 2016 р.); Постанову Кабінету Міністрів України “Про затвердження правил відтворення лісів” (2007 р., ред. 2013 р.); Положення про державну лісову охорону (2009 р., ред. 2016 р.); Лісовий кодекс України (1994 р., ред. 2019 р.); Закон “Про заборону суцільних рубок на гірських схилах в ялицево-букових лісах Карпатського регіону” (1992 р., ред. 2019 р.) [www.dklg.kmu.gov.ua/forest].

Загальна площа лісового фонду України становить 10,4 млн га, із яких вкритих лісовою рослинністю – 9,6 млн га. Загалом 15,9 % площі країни вкриті лісами. Погіршення стану лісів в Україні є однією із найбільших екологічних проблем. На ці процеси істотно впливають вирубки та засихання лісів, особливо хвойних, засміченість, лісові пожежі, забруднення лісів промисловими відходами тощо.

Зважаючи на це, в останні десятиліття інтенсивно ведеться моніторинг лісів. Визначення багатьох характеристик лісів, таких як вид порід, вікові характеристики, ділянки захворюваності лісів, екологічний стан, у світовій практиці реалізується на підставі застосування багатоспектральних та гіперспектральних знімальних систем.

У сучасних картографо-геоінформаційних технологіях завдання, пов’язані із дослідженням стану лісових ресурсів, ефективного лісокористування та ведення лісового моніторингу, визначення площ деревостанів виконують за даними дистанційного зондування Землі.

Розвиток геоінформаційних систем і методів дистанційного зондування забезпечують вихід моніторингу лісів на якісно новий рівень для виконання різних завдань оцінювання стану лісів та лісогосподарської діяльності. Власне на підставі інформації, отриманої та опрацьованої за новими методиками,

можна змінити стан лісів України і засади лісогосподарської галузі.

Аналіз літературних джерел

Визначення сутності моніторингу лісів та його мети, а також складових, які повинні забезпечити ведення моніторингу, підвищення оперативності отримання і якості первинних даних про екологічний стан лісів, зростання рівня адекватності реального екологічного стану лісів та його інформаційної моделі, подано на сайті Державного агентства лісових ресурсів України [www.dklg.kmu.gov.ua/fores].

Виділено такі основні завдання моніторингу лісів: довгострокові систематичні спостереження за станом лісових екосистем України для одержання повної об'єктивної та своєчасної інформації щодо його поточних змін; виявлення та оцінювання природних і антропогенних чинників, які впливають на стан лісів; оцінювання масштабів погіршення стану лісів; з'ясування причин і механізмів зміни їх стану; визначення закономірностей їх сталого функціонування і прогнозування динаміки; інформаційно-аналітична підтримка рішень щодо управління лісами

На сайті [www.dklg.kmu.gov.ua/artikle] подано загальну характеристику лісів України. За допомогою тематичних карт та діаграм показано розподіл лісистості території України за природними зонами: степ, лісостеп, Полісся, Крим, Карпати, Україна загалом; розподіл площі лісів за переважними породами (сосна, дуб, бук, ялина/ялиця, береза, осика/вільха, граб, ясен та інші); розподіл лісів за категоріями залежно від основних виконуваних ними функцій: експлуатаційні, захисні, рекреаційно-оздоровчі ліси, а також ліси природоохоронного, наукового, історико-культурного призначення).

У роботі [Поліщук, 2015] розглянуто проблеми лісового господарства, основою яких вважають недостатній догляд у молодих лісах та надмірні вирубування у пристигаючих та стиглих лісостанах, що призводить до зниження як продуктивності, так і біологічної стійкості українських лісів. Розглянуто загальну характеристику знімальних систем, принципи оцінювання якості аерокосмічних зображень, питання класифікації лісових масивів на підставі зображень високого розрізнення.

Зміни лісового покриву можна дослідити локально із використанням польових робіт, але в регіональному та глобальному масштабах необхідно використовувати методику, яка ґрунтується на даних дистанційного зондування. [Trigg et al., 2006].

Автори публікації [Burshtynska et al., 2014] запропонували гібридний метод класифікації, оснований на визначенні оптимальної кількості класів за неконтрольованою класифікацією з подальшим використанням методу контрольованої класифікації. Запропоновано

критерій визначення оптимальної кількості класів на основі визначення усереднених значень різниць середньої спектральної яскравості класів. Космічні зображення із супутників Ikonos (2002, 2007) та QuickBird (2010) використано для вивчення різних часових змін лісів Карпатського регіону. Для отримання інформації про достовірність досліджень виконано численні наземні спостереження.

Теоретичні основи методів ідентифікації об'єктів, які ґрунтуються на перетворенні спектральних яскравостей, зокрема засади створення і використання вегетаційних індексів, всебічно розглянуто в підручнику "Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи", автори [Кохан та Востоков, 2009].

У статті [Бурштинська та ін., 2019] подано методику моніторингу стану хвойних лісів Прикарпатського регіону на підставі космічних зображень середнього та високого розрізнення із залученням знімків, отриманих з БПЛА, зокрема виявлення ділянок із сухою та пошкодженою хвойною рослинністю. Встановлено, що великої шкоди лісам завдають короїди, які, знищивши здорові дерева, перебираються на нові, не зайняті шкідниками ділянки.

У працях [Sherbinin et al., 2007, Kumar, 2011] підкреслено антропогенний вплив, зокрема забруднення повітря, погіршення якості ґрунтів, води та зміни біологічних видів як загрозу для продуктивності лісових екосистем. Засихають хвойні ліси не лише в Україні, а також у Польщі, Словаччині, Швейцарії, Австрії, Німеччині. Значного поширення засихання лісів набуло в лісах Сибіру та Північної Америки [Katz, 2017].

Глобальні зміни клімату, підвищення температури та зменшення кількості опадів сприяють розвитку шкідників, найпоширеніших саме в хвойних лісах [Зацерковний та ін., 2017].

На сайті [www.dklg.kmu.gov.ua/forest] висвітлено основні проблеми лісових масивів, у яких через зміни в довкіллі, зокрема істотне підвищення середньорічних температур, зменшення кількості опадів протягом вегетаційного періоду, спостерігається швидкий розвиток осередків шкідників, найчастіше короїдів та пов'язаних із ними хвороб лісу. В публікації [Слободяник, 2014] подано класифікацію видів лісів, виділено функціональні завдання моніторингу лісів, описано основні етапи моніторингу із використанням аерокосмічної інформації, а також діапазони електромагнітного випромінювання, які використовують у космічних системах ДЗ для отримання даних, виконано порівняльний аналіз космічних знімків різних типів. Технології дистанційного зондування дають змогу створювати системи моніторингу лісів, зокрема визначення структури насаджень, виявлення змін у лісах унаслідок впливу пожеж, вирубок та інших чинників, які призводять до негативних змін у лісах [Bochenek et al., 2017].

Зміни деревостанів набагато ефективніше можна визначати, використовуючи аналіз серій знімків, що зазвичай підвищує точність аналізу їхнього стану [Крылов та ін., 2011, Franklin et al., 2003].

Окремий напрям досліджень становить методика, у якій для виокремлення різних типів рослинності застосовано вегетаційні індекси. У роботі [Бардиш та Бурштинська., 2014] автори розкрили зміст вегетаційних індексів. Подано таблиці типів основних індексів, характеристики зображень, отриманих за вегетаційними індексами, показано інтерпретаційну перевагу зображень за характерними індексами. Створено композиційне зображення на підставі трьох вегетаційних індексів, яке дає можливість ефективніше розрізнати віковий склад лісу, чітко розмежовувати рослинність, ґрунти та підстильну поверхню. У статті [Семенова, 2014] висвітлено можливість використання спектральних індексів для аналізу посушливих умов на території України. За допомогою вегетаційних індексів, визначених за даними супутникового зондування, у роботі [Karnieli, 2010] досліджено просторовий та часовий зв'язок між LST (land surface temperature) та NDVI на північноамериканському континенті протягом літнього вегетаційного періоду (квітень – вересень) у контексті його придатності для моніторингу посухи та її впливу на рослинність.

У публікації [Кохан, 2011] авторка опрацювала шкалу та подала методичні підходи, які забезпечують характеристику реального стану сільськогосподарських культур і дають змогу визначати щільність посівів протягом вегетаційного періоду. Методика передбачає використання вегетаційних індексів та наземних спостережень. У дослідженні [Kokhan et al., 2020] описано етапи концептуального моделювання для створення системи моніторингу врожаю. Моніторинг ґрунтується на просторових даних, отриманих з кількох джерел. Цей підхід можна запропонувати як методологію для широкого спектра систем моніторингу.

У праці [Миклуш та ін., 2012] викладено основи ДЗ та можливості їх використання у лісовому господарстві, детально окреслено перспективи використання та впровадження їх у лісгосподарську практику. Вказано, що для глобальних завдань, які стосуються великих територій, використовують космічні матеріали найчастіше середнього розрізнення, для оцінювання стану лісів регіонального значення – матеріали середнього та високого розрізнення. В останнє десятиліття застосовують також лазерне сканування місцевості з метою визначення щільності дерев та біомаси листяного покриву. Що ж стосується класифікації, пріоритетними є автоматизовані методи класифікації лісових об'єктів, що дає можливість визначати площі лісових насаджень як важливі для лісгосподарської галузі характеристики.

В останні десятиліття інтенсивно ведеться моніторинг лісів. Визначення багатьох характеристик стану лісів, таких як вид порід, вікові зміни, ділянок захво-

рюваності лісів, екологічний їх стан, у світовій практиці реалізується на підставі даних дистанційного зондування Землі, зокрема за інформацією, отриманою із багатоспектральних, гіперспектральних, лазерних, радіолокаційних та інших знімальних систем.

Мета

Одним із вагомих завдань у складній системі лісокористування та відтворення є класифікація лісів. У сучасних технологічних схемах цю процедуру здійснюють автоматизовано на підставі космічних зображень одним із методів класифікації або їх комбінацією. Завдання ідентифікації сухої та пошкодженої лісової рослинності належить до складних завдань лісівництва.

Мета дослідження: дослідити ефективність використання контрольованої класифікації для ідентифікації лісової рослинності.

Зокрема, в роботі поставлено завдання:

- 1) з'ясувати можливість використання контрольованої класифікації для ідентифікації здорової, засохлої та частково пошкодженої засиханням хвойної рослинності;
- 2) запропонувати ефективний спосіб вибору сигнатур із використанням знімків, отриманих з БПЛА;
- 3) визначити площі класів рослинності після постопрацювання.

Характеристика об'єкта досліджень

Дослідження проведено на території Тухлянського лісництва Сколівського району Львівської області.

На сайті ДСП "Львівлісозахист" подано інформацію про різні види сухоостою. Виділяють шість категорій: перша – здорові дерева; друга – дещо ослаблені дерева; третя – дуже ослаблені насадження; четверта – насадження, які засихають, тобто такі, що до осені відінуть; п'ята – свіжий сухостій, тобто дерева, які всохли буквально цього року; шоста категорія – це старий сухостій без кори.

Об'єктом досліджень є стан лісів Тухлянського лісництва Прикарпатського регіону, предметом досліджень – методика контрольованої класифікації, застосована для ідентифікації різного стану хвойної рослинності та інших класів об'єктів, виокремлених на космічних зображеннях високої розрізненості.

Методика

Для досліджень використано знімок зі знімальної системи супутника GeoEye-1 за серпень 2011 р. Супутник GeoEye-1 запущено у вересні 2008 р. Знімальна оптико-електронна система супутника дає змогу отримувати зображення у панхроматичному режимі з просторовим розрізненням 0,46 м та у мультиспектральних режимах 1,82 м. Знімальна система супутника GeoEye-1 працює у п'яти режимах.

Діапазон мультиспектральних каналів (мкм): 0,45–0,51; 0,51–0,58; 0,625–0,69; 0,78–0,92, панхроматичного – 0,45–0,90 мкм.

На рис. 1 подано синтезований знімок за каналами: зелений, інфрачервоний та червоний. У спектральних зеленому і близькому інфрачервоному каналах рослинність має високу відбивну здатність, у червоному діапазоні довжин електромагнітних хвиль відбувається поглинання сонячної енергії хлорофілом, тому в цьому каналі відбивна здатність нижча.

Методика дослідження складається із двох блоків.

Перший блок робіт – польові роботи. Це експедиційні дослідження для аналізу стану лісів та вибір тестових ділянок для ідентифікації ступеня засихання хвойних дерев. До польових робіт належить знімання із безпілотного літального апарата (БПЛА), розрахунок параметрів знімання, прокладання маршрутів та безпосередньо знімання. Для проведення польових досліджень здійснено три експедиції. Під час останньої експедиції, яка відбулася у червні 2019 р., виконано знімання з безпілотного літального апарата двох тестових ділянок. На ділянках замарковано три типи хвойної рослинності: здорова, засохла і з частковим засиханням (близько 50–60 %) рослинності дерева.

Знімки з БПЛА надалі використано для вибору сигнатур, як і оцінювання точності класифікації.

Другий блок – камеральні дослідження. Вони передбачають вибір методу контрольованої класифікації, класів та сигнатур на ділянці дослідження, виконання класифікації та її аналіз. Сигнатури вибрано на тестових ділянках із використанням знімків із БПЛА, де добре ідентифікуються різні типи рослинності, після чого ці сигнатури використано для дослідження стану хвойних дерев усієї території лісництва. Кінцевим етапом камеральних досліджень є аналіз отриманих результатів.

Структурну схему дослідження подано на рис. 2.

Синтезовані зображення із супутника GeoEye-1, отримані з використанням каналів RGB (а) та NIRGR (б), подано на рис. 3.

На рис. 3, а і 3, б показано ділянки із хвойною рослинністю: 1 – здорова рослинність; 2 – суха рослинність; 3 – пошкоджена рослинність. Як видно з візуального огляду, на рис. 3, б різні види рослинності відображаються контрастніше.

Оскільки завдання дослідження – з'ясувати можливість застосування контрольованої класифікації для ідентифікації різних станів хвойної рослинності, розглянемо теоретичні аспекти проблеми.

У ГІС-технологіях використовують вирішальні правила контрольованої класифікації, основані на параметричних навчальних вибірках:

- правило мінімальної відстані;
- правило відстані Махаланобіса;
- правило максимальної вірогідності (за Байесом).

На підставі теоретичних і експериментальних досліджень [Swain and Davis, 1978, Burshtynska et.al., 2014] встановлено, що найвищої точності класифікації досягнуто із використанням методу максимальної вірогідності.

Метод максимальної вірогідності ґрунтується на вірогідності належності певного пікселя до визначеного класу. Базове рівняння припускає, що ці вірогідності однакові для всіх класів, у них нормальний закон розподілу даних. Є можливість врахувати різну вірогідність для всіх класів через введення так званого вагового чинника. Цей варіант методу максимальної вірогідності відомий ще як метод Байєса. Утім, якщо немає апріорних знань про вірогідність, не потрібно вказувати ваговий чинник. У цьому випадку для усіх класів він дорівнює 1,0 у базовому рівнянні.

Рівняння для здійснення класифікації за методом найбільшої вірогідності має вигляд [Кохан та Востоків, 2009]:

$$D = \ln(a_m) - \frac{1}{2} \ln(|K_m|) - \frac{1}{2} (X - M_m)^T (K_m^{-1}) (X - M_m) \quad (1)$$

де D – вагова відстань (вірогідність); a_m – відсоток вірогідності, тобто належності класифікованого пікселя до класу m (дорівнює 1,0 або вводиться на основі апріорних даних); $|K_m|$ – детермінант матриці K_m . Піксель належить до класу m , якщо обчислене для нього D є мінімальним. Нижче подано вирази елементів вектора сигнатур та коваріаційної матриці класу m .

$$M_m^T = [M_{1m} \ M_{2m} \ \dots \ M_{nm}]^T, \quad (2)$$

$$K_m = \begin{bmatrix} S_{11m} & S_{12m} & \dots & S_{1nm} \\ S_{21m} & S_{22m} & \dots & S_{2nm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{n1m} & S_{n2m} & \dots & S_{nnm} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Перевага методу – в урахуванні параметрів розподілу сигнатур класів, що визначаються. Недолік – істотна залежність від нормального розподілу даних сигнатур у кожному каналі.

Зі спеціальної літератури відомо, що для отримання вірогідного результату класифікації рекомендують створювати вибірки розміром (за кількістю пікселів) не меншим, ніж кількість каналів $n \times 100$ (у цьому випадку – 400 пікселів) [Swain and Davis, 1978]. Сигнатури вибирають на тестових ділянках з використанням знімків з БПЛА, що дає можливість ідентифікувати різні типи рослинності. Після цього сигнатури використовують для дослідження стану хвойних дерев усієї території лісництва.

Результати

Здійснено вибірки для шести класів: дороги, трав'яниста рослинність, кущова рослинність, здорова хвойна рослинність, засохла хвойна рослинність, хвойна рослинність, яка засихає (рис. 4).

Для складних об'єктів, таких як цілком засохлий або частково засохлий ліс, вибрати значні за розміром ділянки неможливо. Тому вибрано менші сигнатури в різних місцях знімка. Так, для чотириканального зображення необхідно вибирати: сигнатури розміром

5×5 пікселів на 15–20 ділянках знімка; розміром 10×10 пікселів – на чотирьох ділянках знімка.

На рис. 5 подано приклади вибраних сигнатур.

На рис. 6 наведено гістограми та діаграми розсіювання, за допомогою яких можна виконати аналіз роздільності класів. Звернемо особливу увагу на виділення класів, які характеризують стан хвойної рослинності, зокрема: засохла, пошкоджена засиханням і здорова рослинність.

На першій і другій гістограмах чітко ідентифікуються дороги. Що ж стосується рослинності, то на першому і другому зображеннях рослинність, яка засихає, і здорова майже не розділяються. На третій гістограмі, побудованій на підставі інфрачервоного каналу, чітко розрізняються рослинність, яка засихає, і повністю засохла, широким діапазоном представлена зелена рослинність.

Діаграми розсіювання на всіх зображеннях: між першим і другим каналом, першим і третім та другим і третім вказують на чітке розмежування зелених, червоних і фіолетових барв, які відображають здорову, засохлу і вражену засиханням рослинність.

Контрольована класифікація – це система, яку застосовують для кількісного аналізу даних ДЗЗ. Вона потребує здійснення певних процедур:

- визначити класи, які необхідно розпізнати на зображенні та які однозначно відображені на знімку;
- визначити репрезентативні пікселі, що представляють кожен клас на зображенні (тренувальні дані або сигнатури);
- оцінити тренувальний набір даних за правилами виконання класифікації;
- здійснити контрольовану класифікацію;
- створити тематичну карту чи узагальнену таблицю результатів класифікації;
- перевірити якість дешифрування на основі різних картографічних матеріалів чи польових досліджень.

На рис. 7 подано класифіковане зображення Тухлянського лісгоспу, створене методом максимальної вірогідності за мультиспектральним знімком, отриманим із супутника GeoEye-1.

Як зазначено вище, достовірність виконання класифікації за правилом максимальної вірогідності залежить від точності визначення вектора середніх значень та коваріаційної матриці, які, своєю чергою, залежать від достатньої кількості тренувальних даних для кожного класу. Тому для отримання якісних результатів класифікації важливо правильно набирати сигнатури об'єктів.

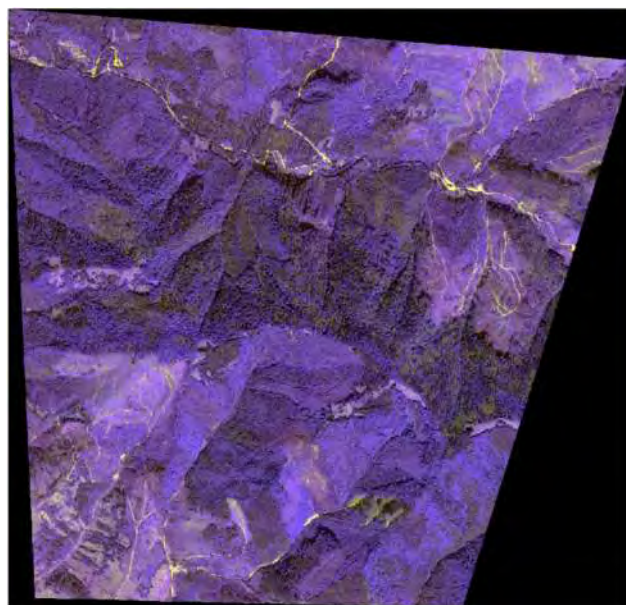


Рис. 1. Знімок GeoEye-1 території Тухлянського лісгоспу

Fig. 1. Image GeoEye-1 on the territory of Tukhlyanske forestry

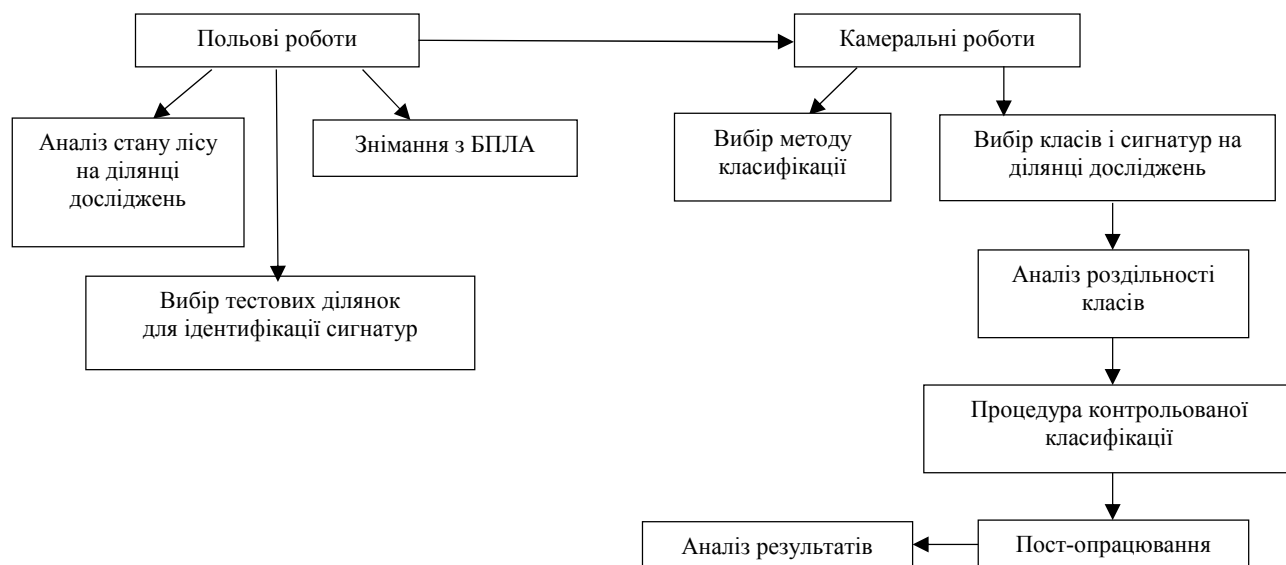


Рис. 2. Структурна схема дослідження стану лісів

Fig. 2. Workflow of the study of the state of forests

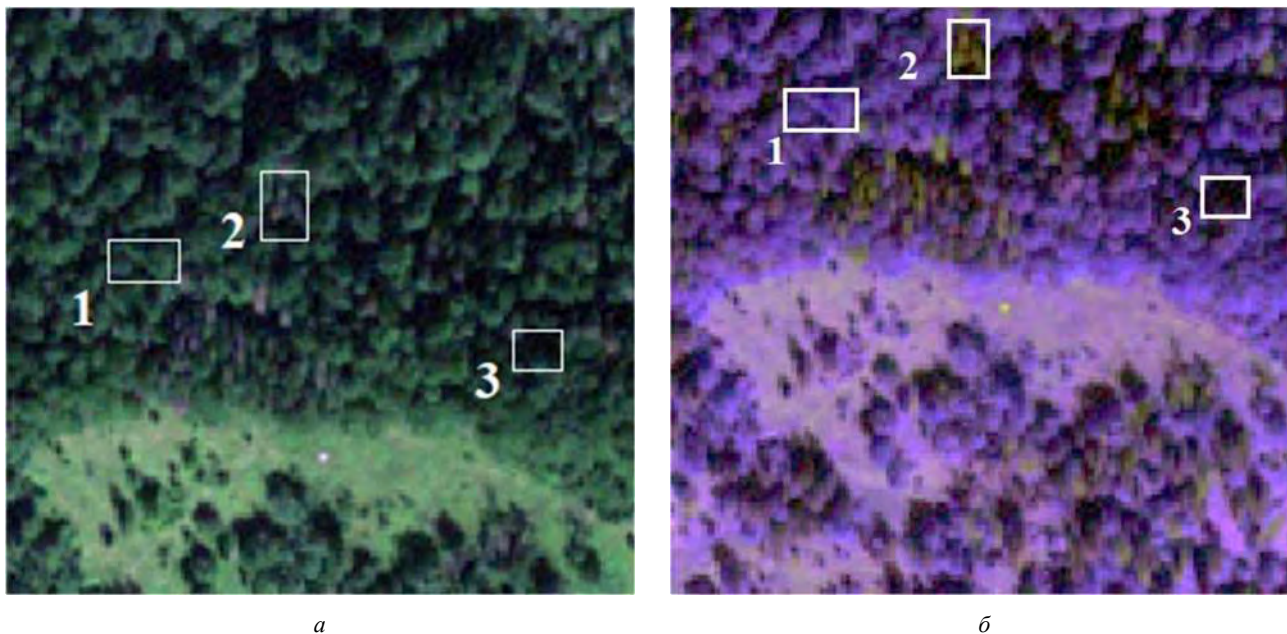


Рис. 3. Синтезовані зображення, отримані із каналів: а – RGB; б – NIRGR

Fig. 3. Composit images obtained from bands: a – RGB; b – NIRGR

ID	Class Name	Value	Color	Count
1	Дороги	1	Orange	408
2	Трав'яниста ...	20	Light Green	432
3	Кущі	30	Dark Green	426
4	Здорова рос...	34	Dark Green	422
5	Засохла рос...	53	Red	228
6	Засихаюча р...	109	Purple	405

Рис. 4. Вибіркі класів на ділянці досліджень

Fig. 4. Samples of classes in the research site

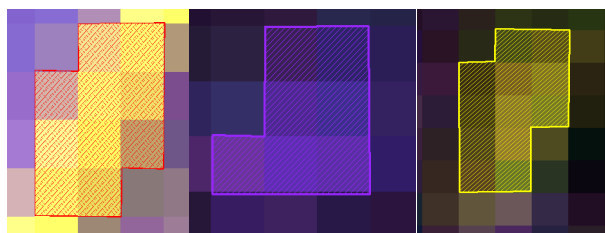
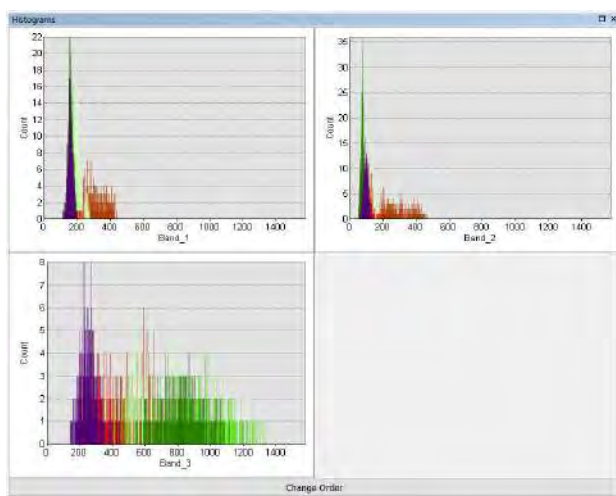
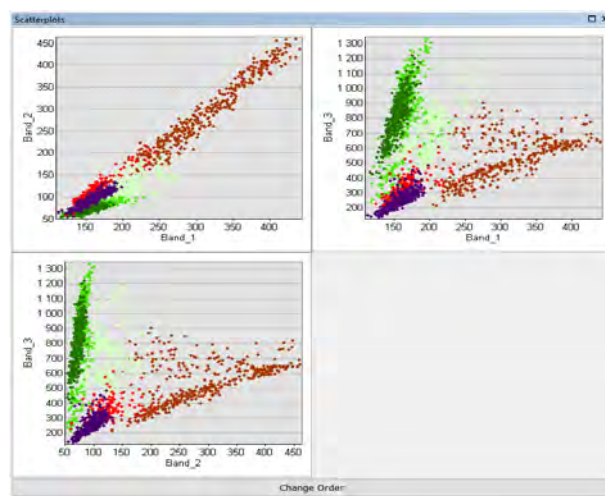


Рис. 5. Приклади вибраних сигнатур

Fig. 5. Examples of selected signatures



а



б

Рис. 6. Гістограми (а) та діаграми розсіювання (б) сигнатур класів

Fig. 6. Histograms (a) and scattering diagrams (b) of class signatures

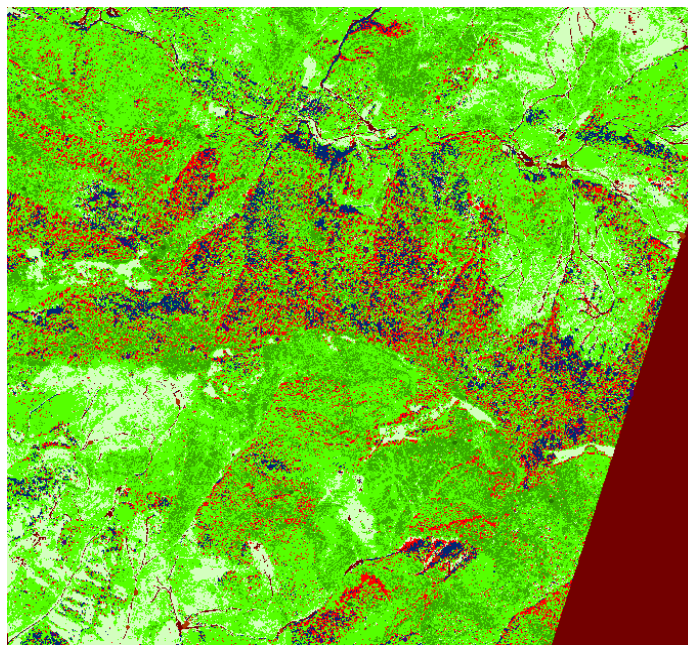
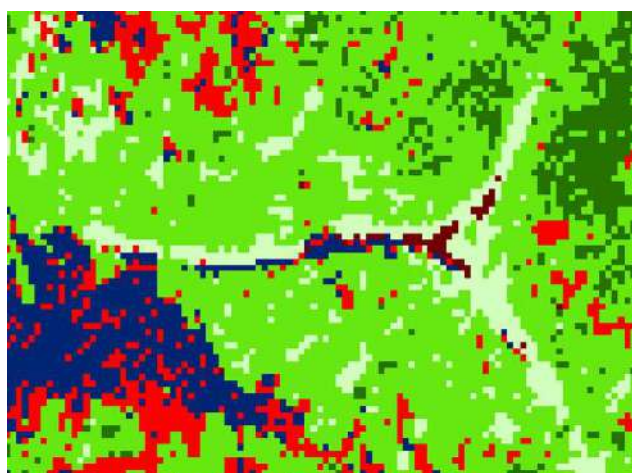
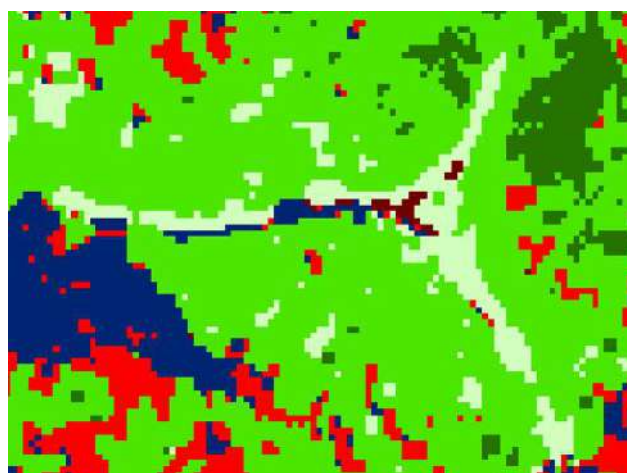


Рис. 7. Класифіковане зображення Тухлянського лісгоспу

Fig. 7. Classified image of Tukhlyanske forestry



а



б

Рис. 8. Класифіковане (а) та опрацьоване процедурою Majority Filter (б) зображення

Fig. 8. Classified (a) and processed by Majority Filter (b) images

На рис. 8 подано фрагмент класифікованого зображення та цей самий фрагмент, до якого застосовано процедуру Majority Filter, для того щоб вилучити поодинокі пікселі.

В узагальненій таблиці подано результати дослідження у вигляді площі кожного класу і їх відсоткове співвідношення.

За результатами класифікації на досліджуваній ділянці встановлено, що здорова хвойна рослинність займає 12 % площі, засохла – 11 % і пошкоджена засиханням – 7 %.

Оцінку точності контрольованої класифікації здійснено на підставі двох тестових ділянок, знятих з БПЛА. Площа тестових ділянок становить 110 га. За результатами знімання створено ортофотоплан, площі ділянок якого для основних типів хвойної рослинності: здорової, засохлої та частково пошкодженої засиханням порівняно з площами, визначеними за допомогою контрольованої класифікації. Результати вказують, що для здорової та засохлої рослинності площі збігаються на 75–80 %, для пошкодженої засиханням на 63–72 %. Зауважимо, що на складніших ділянках результати будуть нижчими.

Результати дослідження

Номери класів	Кількість пікселів	Площа класів, га	Відсоток від заг. пл., %
1	48944	582	1
2	559882	12596	12
3	2529664	59910	57
4	550454	12384	12
5	532291	11975	11
6	330536	7436	7

Висновки

1. Опрацьовано методику визначення стану хвойних лісів на підставі використання зображень високої розрізняювальної здатності та знімків із безпілотних літальних апаратів.

2. Знімки з безпілотних літальних апаратів використано для створення сигнатур різних класів, зокрема здорової, враженої частковим засиханням та засохлої рослинності.

3. Використання методу контрольованої класифікації дає можливість розділяти здорову, засохлу і частково пошкоджену засиханням хвойну рослинність.

4. Для ефективного виконання класифікації необхідно правильно вибирати навчальні вибірки, особливо це стосується анклавів пошкодженої засиханням і засохлої рослинності.

5. Загалом як польові роботи, так і камеральні, здійснені на підставі методів автоматизованої класифікації, потребують вдосконалення і подальших пошуків.

Література

- Bochenek, Z., Ziolkowski, D., Bartold, M., Orlowska K. and Ochtyra A. (2017). Monitoring forest biodiversity and the impact of climate on forest environment using high-resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing*, Vol. 51, 166–181.
- Burshtynska K., Polishchuk B. and Madyar J. (2014). The definition of the area of felling forests by high resolution satellite images. *GLL*, No. 3, 43–54.
- Franklin S. E., Wulder M. A., Skakun R. S. and Carroll A. L. (2003). Mountain pine beetle red attack forest damage classification using stratified Landsat TM data in British Columbia, Canada. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, No. 69(3), 283–288.
- Karnieli A., Adam N., Pinker R. T., Anderson M., Imhoff M. L., Gutman G. G., Panov N., Goldberg A. (2010). Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *J. Climate*, Vol. 23, 618–633.
- Katz Ch. (2017). Small Pests, Big Problems: The Global Spread of Bark Beetles. URL: <https://e360.yale.edu/features/small-pests-big-problems-the-global-spread-of-bark-beetles>.
- Kokhan S. (2020). Improved Approach to the Development of the Crop Monitoring System Based on the Use of Multi-Source Spatial Data. *Journal of Ecological Engineering*, No. 21 (7), 108–114.
- Kumar D. (2011). Monitoring Forest Cover Changes Using Remote Sensing and GIS: A Global Prospective. *Research Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, 105–123.
- Sherbinin A., Carr D., Cassels S. and L. Jiang. (2007). Population and environment. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32, 345–373.
- Swain P. H., Davis S. M. (eds.) (1978). Remote sensing – the quantitative approach. New York, 396 p.
- Trigg S. N., Curran L. M. and McDonald A. K. (2006). Utility of Landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in southeast Asia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, Vol. 27, 49–66.
- Бардиш Б., Бурштинська Х. (2014). Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Вип. II (28), С. 82–88.
- Бурштинська Х., Петрик Ю., Поліщук Б., Шило Є. (2019). Моніторинг засихання хвойних лісів Прикарпатського регіону з використанням даних дистанційного зондування. *Геодезія, картографія та аерофотознімання*, Вип. 90, С. 29–40.
- Бурштинська Х., Денис Ю., Мадяр Ю., Поліщук Б. (2016). Методика двоетапної класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, Вип. 1, С. 148–155.
- Зацерковний В., Оберемок Н., Ягорлицька К. (2017). Застосування технологій ГІС і ДЗЗ в задачах моніторингу лісових ценозів. *Наукові технології*, Вип. 4 (36), С. 350–357.
- Кохан С., Востоков А. (2009). Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. Київ: Вища школа, 511 с.
- Кохан С. (2011). Застосування вегетаційних індексів на основі серії космічних знімків IRS-1D LISS-III для визначення стану посівів сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*, Т. 17, № 5, С. 58–63.
- Крылов А. М., Соболев А. А., Владимиров Н. А. (2011). Выявление очагов короеда-типографа в

- Московской области с использованием снимков Landsat. *Лесной вестник, Вып. 4*, С. 54–60.
- Миклуш С. І., Гаврилюк С. А., Часковський О. Г. (2012). Дистанційне зондування Землі в лісовому господарстві: навч. посіб. Львів. ЗУКЦ, 324 с.
- Поліщук Б. (2015). Методи опрацювання космічних зображень високого розрізнення для класифікації лісів (на прикладі Прикарпатського регіону): автореф.: дис. канд. техн. наук. Львів.
- Семенова І. Г. (2014). Використання вегетаційних індексів для моніторингу посух в Україні. *Український гідрометеорологічний журнал, № 14*, С. 43–52.
- Сидельник Н. Я., Пушкин А. А., Ковалевский С. В. (2018). Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС-технологий. *Труды БГТУ, Вып. № 1*, С. 5–12.
- Слободяник М. П. (2014). Використання методів ДЗ та ГИС-технологій для моніторингу лісових ресурсів. *Вісник геодезії та картографії, №1 (88)*, С. 27–31.

Kh. BURSHTYNSKA, Y. DEKALIUK

Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, 6/622, Karpinskoho str., Lviv, 79013, Ukraine, tel. +380672561130, e-mail: bursht@polynet.lviv.ua; orcid 0000-0002-6013-0873

MONITORING CONIFEROUS FORESTS USING REMOTE SENSING DATA (on the example of Tukhlyanske forestry)

The purpose of the work is to consider the state of coniferous forests of the Tukhlyanske forestry of the Precarpathian region. Changes in land cover, pollution of air, water and soil, and deterioration of their quality, loss of biological diversity occur for forest ecosystems at the regional and global levels. Climate change, rising temperatures and declining rainfall are provoking the development of pests that are most common in coniferous forests. Remote sensing technologies allow to create forest monitoring systems, including determination of plantation structure, detection of changes in forests due to fires, deforestation, environmental problems, in particular forest drying. **The method** of detecting changes in forests is based on the use of high-resolution space imagery and on the processing of images obtained from unmanned aerial vehicles to identify healthy, dried and partially damaged by drying conifers in test areas. **The result** of the study is an image obtained by the method of controlled classification. The accuracy of the classification depends on the choice of signatures, and for that the UAV images are used. **Scientific novelty and practical significance.** A method for the identification of different states of coniferous forests using the method of controlled classification by the algorithm of maximum probability is proposed. The choice of class signatures is fundamental to solving the problem. The technique can be applied in various structures of forestry.

Key words: remote sensing of the Earth; methods of image classification; signatures; space images; images from unmanned aerial vehicles.

References

- Bochenek, Z., Ziolkowski, D., Bartold, M., Orłowska K. and Ochtyra A. (2017). Monitoring forest biodiversity and the impact of climate on forest environment using high-resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing, Vol. 51*, 166–181.
- Burshtynska K., Polishchuk B. and Madyar J. (2014). The definition of the area of felling forests by high resolution satellite images. *GLL, No. 3*, 43–54.
- Franklin S. E., Wulder M. A., Skakun R. S. and Carroll A. L. (2003) Mountain pine beetle red attack forest damage classification using stratified Landsat TM data in British Columbia, Canada. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, No. 69(3)*, 283–288.
- Karnieli A., Adam N., Pinker R. T., Anderson M., Imhoff M. L., Gutman G. G., Panov N., Goldberg A. (2010). Use of NDVI and Land Surface Temperature for Drought Assessment: Merits and Limitations. *J. Climate, Vol. 23*, 618–633.
- Katz Ch. (2017). Small Pests, Big Problems: The Global Spread of Bark Beetles. URL: <https://e360.yale.edu/features/small-pests-big-problems-the-global-spread-of-bark-beetles>.

- Kokhan S. (2020). Improved Approach to the Development of the Crop Monitoring System Based on the Use of Multi-Source Spatial Data. *Journal of Ecological Engineering*, No. 21 (7), 108–114.
- Kumar D. (2011). Monitoring Forest Cover Changes Using Remote Sensing and GIS: A Global Prospective. *Research Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, 105–123
- Sherbinin A., Carr D., Cassels S. and L. Jiang. (2007). Population and environment. *Annual Review of Environment and Resources*, Vol. 32, 345–373.
- Swain P. H., Davis S. M. (eds.) (1978). Remote sensing – the quantitative approach. New York, 396 p.
- Trigg S. N., Curran L. M. and McDonald A. K. (2006). Utility of Landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in southeast Asia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, Vol. 27, 49–66.
- Bardysh B., Burshtynska Kh. (2014). Vykorystannia vehetatsiinykh indeksiv dlia identyfikatsii ob'ektiv zemnoi poverkhni. *Cuchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. II (28), 82–88 [in Ukrainian].
- Burshtynska Kh., Petryk Yu., Polishchuk B., Shylo Ye. (2019). Monitorynh zasykhannia khvoynykh lisiv Prykarpatskoho rehionu z vykorystanniam danykh dystantsiinoho zonduvannia. *Heodeziia, kartohrafiia ta aerofotoznimannia*. Vyp. 90, 29–40 [in Ukrainian].
- Burshtynska Kh., Denys Yu., Madiar Yu., Polishchuk B. (2016). Metodyka dvoetapnoi klasyfikatsii lisiv za kosmichnymy zobrazhenniamy vysokoho rozriznennia. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva*, Vyp. 1, 148–155 [in Ukrainian].
- Zatserkovnyi V., Oberemok N., Yahorlytska K. (2017). Zastosuvannia tekhnolohii HIS i DZZ v zadachakh monitorynhu lisovykh tsenoziv. *Naukoiemni tekhnolohii*, Vyp. 4 (36), 350–357 [in Ukrainian].
- Kokhan S., Vostokov A. (2009). Dystantsiine zonduvannia Zemli: teoretychni osnovy: pidruchnyk. Kyiv: Vyscha shkola, 511 s. [in Ukrainian].
- Kokhan S. (2011). Zastosuvannia vehetatsiinykh indeksiv na osnovi serii kosmichnykh znmkiv IRS-1D LISS-III dlia vyznachennia stanu posiviv silskohospodarskykh kultur. *Kosmichna nauka i tekhnolohiia*, T. 17, No. 5, 58–63 [in Ukrainian].
- Krylov A. M., Sobolev A. A., Vladymyrova N. A. (2011). Vyiavlenye ochahov koroeda-typohrafa v Moskovskoi oblasti s ispolzovanyem snimkov Landsat. *Lesnoi vestnyk*, Vyp. 4, 54–60 [in Russian].
- Myklush S. I., Havryliuk S. A., Chaskovskiy O. H. (2012). Dystantsiine zonduvannia Zemli v lisovomu hospodarstvi: navch.posibnyk. Lviv. ZUKTs, 324 s. [in Ukrainian].
- Polishchuk B. (2015). Metody opratsiuvannia kosmichnykh zobrazen vysokoho rozriznennia dlia klasyfikatsii lisiv (na prykladi Prykarpatskoho rehionu): avt. dys. ...kand. tekhn. nauk. Lviv [in Ukrainian].
- Semenova I. H. (2014). Vykorystannia vehetatsiinykh indeksiv dlia monitorynhu posukh v Ukraini. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal*, No. 14, 43–52 [in Ukrainian].
- Sydelynyk N. Ia., Pushkyn A. A., Kovalevskiy S. V. (2018). Kartyrovanye povrezhdennykh lesnykh nasazhdeniy i ob'ektov lesokhoziaistvennykh meropriyatiy s yspolzovanyem materyalov kosmycheskoi sjemky i HYS-tekhnolohiy. *Trudy BHTU*, Vyp. 1, 5–12 [in Russian].
- Slobodianyk M. P. (2014). Vykorystannia metodiv DZ ta HIS-tekhnolohii dlia monitorynhu lisovykh resursiv. *Visnyk heodezii ta kartohrafii*, No. 1 (88), 27–31 [in Ukrainian].

