

КАРТОГРАФІЯ І АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

УДК 528.46:711.14

Х. В. БУРШТИНСЬКА¹, Ю. В. ПЕТРИК^{1*}, Б. В. ПОЛЩУК¹, О. Є. ШИЛО²

¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна, ел. пошта: yuliya.denys@gmail.com

² Кафедра інженерної геодезії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна.

<https://doi.org/10.23939/istcgcap2019.90.029>

МОНІТОРИНГ ЗАСИХАННЯ ХВОЙНИХ ЛІСІВ ПРИКАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ З ВИКОРИСТАННЯМ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Для моніторингу стану лісів Тухлянського лісництва застосовано методику, що ґрунтується на використанні різних за спектральними характеристиками і розрізненістю космічних зображень, знімків, отриманих з БПЛА і, відповідно, їх опрацювання різними методами. Здійснено спектрофотометричні вимірювання здорової та пошкодженої хвойної рослинності для обґрунтування методів подальшого опрацювання зображень, розроблення ефективних підходів до ідентифікації ділянок із засиханням хвойних дерев. Аналіз отриманих спектральних кривих дає змогу вибирати відповідні діапазони електромагнітного спектра для ідентифікації пошкодженої та сухої рослинності. Дослідження ґрунтується на використанні космічних знімків високого та середнього розрізнення, одержаних із супутників GeoEye-1 та Sentinel-2 на території Тухлянського лісництва. Для отримання звіркової інформації та аналізу результатів використано знімання з безпілотної літальної апарату. Дослідження виконано на території Тухлянського лісництва Сколівського району Львівської області. Для проведення польових досліджень здійснено три експедиції. Під час останньої експедиції знято з безпілотної літальної апарату дві тестові ділянки. З метою ефективного використання спектральних ділянок відбиття відібрано зразки різного типу хвойної рослинності для проведення спектрофотометричних вимірювань. Аналіз отриманих спектральних кривих використано для вибору вегетаційних індексів, що дають змогу ідентифікувати пошкоджену та здорову рослинність. Для поліпшення інтерпретаційних можливостей індексних зображень створено синтезоване зображення за трьома вегетаційними індексами. Щоб визначити площі ділянок із пошкодженою хвойною рослинністю виконано контрольовану класифікацію за методом максимальної вірогідності. Проаналізовано отримані результати.

Ключові слова: моніторинг лісів, засихання хвойних лісів, дистанційне зондування, космічні знімки, вегетаційні індекси, класифікація.

Вступ

Загальна площа лісового фонду України становить 10,4 млн га, з них вкриті лісом землі – 9,6 млн га. Ліси займають більш ніж 15,7 % території України і розташовані переважно на Поліссі та в Карпатах. Вони відіграють важливу роль у багатьох екологічних процесах, зокрема впливають на клімат, атмосферу, водні об'єкти, зменшують різкість коливань температури і вологості, охороняють ґрунти від водної і вітрової ерозії.

Збільшення антропогенного впливу, зокрема зміни земельного покриву, забруднення повітря, води та ґрунтів, погіршення якості ґрунтів та втрати біологічного різноманіття становлять загрозу для продуктивності лісових екосистем на регіональному та глобальному рівнях [Sherbinin, et al., 2007; Kumar, 2011].

За останні 5–7 років на всій території України спостерігається масове засихання таких лісових порід, як ялина, ясен, дуб, граб та береза, але найбільше занепокоює стан хвойних лісів, зокрема соснових насаджень, де ситуація стала катастрофічною. Цей процес стає глобальним. На цьому наголошено під час засідання колегії Державного агентства лісових ресурсів України 25 квітня 2019 р. [Державне агентство лісових ресурсів України, 2019].

Сьогодні явище засихання сосни поширене у Житомирській, Рівненській, Волинській, Львівській та інших областях зі значними площами соснових насаджень. Станом на вересень 2019 р. загальна площа засихання лісів становила понад 413 тис. га, з них насаджень сосни звичайної – 222 тис. га, ялини європейської – 27 тис. га, дуба звичайного – 100 тис.

га та інших насаджень – 64 тис. га [Державне агентство лісових ресурсів України, 2019].

Засихають хвойні ліси не лише в Україні, а й у Польщі, Словаччині, Швейцарії, Австрії, Німеччині. Значно поширене засихання лісів Сибіру та Північної Америки [Katz, 2017].

Глобальні зміни клімату, підвищення температури та зменшення кількості опадів провокують розвиток шкідників, що найпоширеніші саме в хвойних лісах [Зацерковний та ін., 2017]. Серед шкідників лісу найбільше стовбурних шкідників, зокрема, короїдів. Колись їх називали вторинними, але зараз вони пошкоджують більшість хвойних і листяних лісів. За останні чотири роки площа лісів на території України, вражених стовбурними шкідниками, збільшилась більше ніж у 7 разів.

Як зазначено на офіційному сайті ДСП “Львівлісозахист”, площа хвойних лісів на території ДП “Славське лісове господарство” становить 15,5 тис. га, з них засихаючих на початок 2016 р. – 6,7 тис. га. Щорічні темпи засихання хвойних лісів становлять 0,3–0,4 тис. га [ДСП “Львівлісозахист”, 2016].

На сайті ДСП “Львівлісозахист” йдеться також про різні види сухостою. Виділяють шість категорій сухостою: шоста категорія – це старий сухостій без кори; п’ята – свіжий сухостій, тобто дерева, які всохли буквально цього року; четверта – засихаючі, тобто такі, що до осені відімруть; третя – дуже ослаблені насадження; друга – ослаблені дерева; перша – абсолютно здорові дерева. Шоста, п’ята та четверта категорії підлягають обов’язковому вирубуванню.

Зміни лісового покриву можуть бути досліджені локально з використанням польових досліджень, але у регіональному та глобальному масштабах обов’язковою є методика, яка ґрунтується на даних дистанційного зондування [Trigg, et al., 2006].

Технології дистанційного зондування дають змогу створювати системи моніторингу лісів, враховуючи визначення структури насаджень, виявлення змін у лісах у результаті впливу пожеж, вирубок й інших чинників, які призводять до негативних змін у лісах [Bochenek, et al., 2017].

Доцільність використання матеріалів дистанційного зондування для виявлення пошкод-

жених ділянок лісу полягає у високому ступеню оперативності моніторингу на великих площах охоплення, що важливо для територій лісових регіонів.

З використанням космічних знімків для виявлення засихання дерев застосовують і візуальне і автоматизоване дешифрування. Автоматизоване виявлення пошкоджених лісових ділянок ґрунтується на використанні комп’ютерної класифікації знімків. Для поодиноких знімків часто використовують різні типи класифікацій із застосуванням еталонів, наприклад, за методом максимальної вірогідності. Виявлення змін за допомогою аналізу серій знімків зазвичай показує вищу точність [Крылов, та ін., 2011; Franklin, et al., 2003]. У науковій літературі проаналізовано варіанти спектрального синтезування для кращого виявлення досліджуваних об’єктів, а також звернено увагу на закономірності поглинання та відбиття випромінювання рослинністю в різних спектральних ділянках [Зацерковний, та ін., 2017]. Для отримання нових зображень, які дають змогу ефективніше ідентифікувати різні стани рослинності, часто використовують вегетаційні індекси. Їх широко застосовують для картографування рослинності, оцінювання показників біопродуктивності сільськогосподарських культур, вмісту хлорофілу. Вегетаційні індекси дають змогу виявляти ті особливості зображень, які складно інтерпретувати навіть на синтезованих знімках [Кохан, Востоков, 2011; Бардиш, Бурштинська, 2014].

З метою ефективного використання даних дистанційного зондування використовують спектри природних об’єктів, які можна отримати за допомогою спектрометрів. Як результат, отримують кількісне вимірювання яскравості, освітленості, відбиття земної поверхні. Такі дані потрібні для з’ясування оптимальних технічних характеристик аерокосмічних сенсорів [Станкевич, та ін., 2010].

Результативність виявлення ділянок із сухою та пошкодженою рослинністю належить до непростих завдань лісівництва. Вони полягають у використанні автоматизованого методу ідентифікації сухої та пошкодженої рослинності (2, 3 та 4 категорії). Таке розділення важливе з огляду на використання деревини:

якщо сухостій надається лише на спалювання, то частково пошкоджену деревину можна використати у промисловому виробництві.

Мета

Мета роботи – моніторинг стану хвойних лісів Тухлянського лісництва Прикарпатського регіону на підставі космічних зображень середнього та високого розрізнення з залученням знімків, отриманих із БПЛА, зокрема виявлення ділянок із сухою та пошкодженою хвойною рослинністю.

Методика

Для реалізації завдання стосовно ідентифікації хвойної рослинності різних категорій розроблено методику ефективного використання різних за спектральними характеристиками і розрізненістю космічних зображень, знімків, отриманих із БПЛА, а також методику їх опрацювання.

З метою обґрунтування методів подальшого опрацювання зображень, розроблення ефективних підходів до ідентифікації різних за типом та розміром ділянок засихання хвойних дерев здійснено спектрофотометричні вимірювання здорової та пошкодженої хвойної рослинності. Аналізування отриманих спектральних кривих дає змогу вибирати відповідні діапазони електромагнітного спектра для ідентифікації пошкодженої та сухої рослинності.

Дослідження ґрунтується на використанні космічних знімків високого та середнього розрізнення, отриманих із супутників GeoEye-1 та Sentinel-2 на територію Тухлянського лісництва, для визначення площ із засиханням хвойних лісів. Щоб отримати звіркову інформацію та аналіз результатів, використано знімання з безпілотного літального апарата.

Матеріали досліджень:

- 1) ортофотоплан лісництва з позначеними ділянками із засиханням хвойних дерев (2007);
- 2) знімки середнього розрізнення із супутників Sentinel-2 (серпень, 2017; серпень, 2018, серпень, 2019);
- 3) знімок із супутника GeoEye-1 (серпень, 2011);
- 3) знімки та ортофотозображення, отримані із БПЛА (червень, 2019).

Супутники Sentinel 2A та 2B, запущені 23 червня 2015 року та 7 березня 2017 року відповідно, призначені для знімання у 13 мультиспектральних режимах із просторовим розрізненням 10, 20 та 60 м. Запущені у межах проекту Європейського космічного агентства Copernicus.

Супутник GeoEye-1 запущений 6 вересня 2008 року. Знімальна оптико-електронна система супутника дає змогу отримувати зображення у панхроматичному режимі з просторовим розрізненням 0,46 м та у мультиспектральному режимі – 1,82 м. Знімальна система супутника GeoEye-1 працює у 5 режимах.

Методика дослідження складається із трьох блоків.

Перший блок робіт – польові роботи. Вони передбачають експедиційні дослідження для аналізування стану лісів та вибір тестових ділянок для ідентифікації ступеня засихання хвойних дерев.

Другий блок – знімання з безпілотного літального апарату (БПЛА), що охоплює розрахунок параметрів знімання, прокладання маршрутів та безпосередньо знімання.

Третій блок – камеральні дослідження. Їх проводять спочатку на тестових ділянках, після чого результати використовують для дослідження стану хвойних дерев всієї території лісництва. Кінцевий етап камеральних досліджень – аналізування отриманих результатів.

Структурну схему дослідження подано на рис. 1.

Важливим етапом дослідження є вибір вегетаційних індексів, які дають змогу найефективніше ідентифікувати здорову та пошкоджену хвойну рослинність. Вегетаційні індекси як комбінації відбиття поверхні з двох або більшої кількості спектральних каналів допомагають виявляти певні властивості рослинності. У науковій літературі опубліковано понад 200 типів вегетаційних індексів, але лише невелика підмножина має істотну біофізичну основу, яку систематично вдосконалюють.

На підставі спектрофотометрування та аналізу груп вегетаційних індексів вибрано такі вегетаційні індекси, які дають можливість виявляти найбільшу різницю між пошкодженою та здоровою рослинністю.

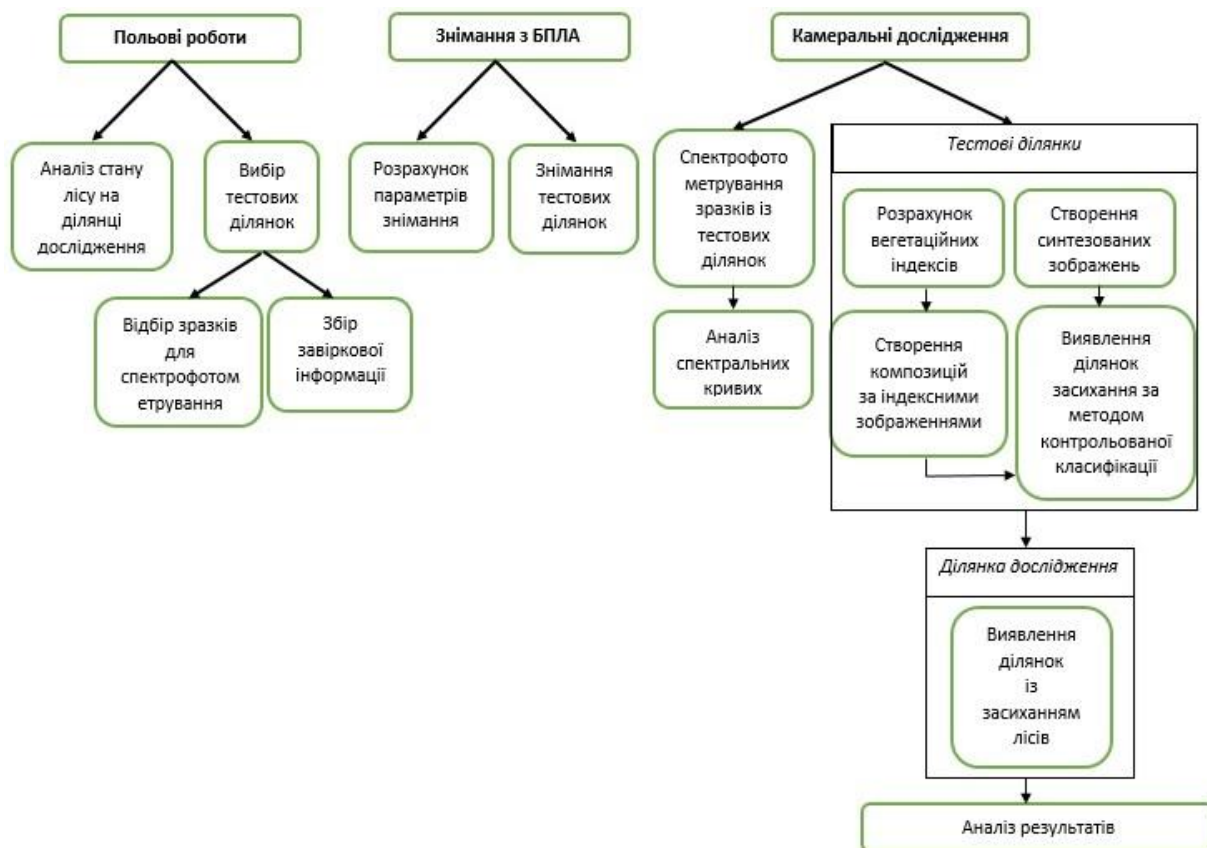


Рис. 1. Структурна схема дослідження

Таблиця 1

Основні групи вегетаційних індексів

№	Назва групи	Характеристика
1	Broadband Greenness	Характеризують загальну кількість рослинності та її стан. Основне призначення цих індексів – картування рослинного покриву, виявлення площ ділянок вкритих і не вкритих рослинністю, оцінювання та моніторинг стану рослинного покриву, оцінювання продуктивності і врожайності.
2	Narrowband Greenness	Використовують для оцінювання кількості і стану рослинності, як й індекси попередньої групи. Відмінність в тому, що для розрахунків цих індексів використовують ділянку ближнього інфрачервоного каналу (“red edge”), що дає змогу фіксувати навіть незначні зміни стану рослинності.
3	Light Use Efficiency	Враховують співвідношення між різними типами пігментів для оцінювання ефективності використання світла. Вони добре корелюють із ефективністю засвоєння вуглецю і активністю росту. Також індекси цієї групи тісно пов’язані з поглинанням активної радіації.
4	Canopy Nitrogen	Використовують для оцінювання вмісту і концентрації азоту у рослинному покриві. Азот входить до складу білків, хлорофілу і багатьох інших органічних сполук. За азотного голодування листя набувають блідо-зеленого кольору, дрібнішають.
5	Dry or Senescent Carbon	Враховують вміст “сухого” вуглецю у вигляді лігніну і целюлози. Такий вуглець у великих кількостях міститься в мертвих або сухих рослинних тканинах, збільшення цих показників може відображати процес “старіння” або відмирання рослин.
6	Leaf Pigments	Враховують вміст пігментів каротиноїду і антоціаніну, що характерні для пошкодженої рослинності. Їх можна застосовувати для моніторингу стану та оцінки врожайності.
7	Canopy Water Content	Використовують для оцінювання вмісту води в рослинах. Високий вміст води характерний для здорової рослинності.

Отримані індексні зображення слугують для здійснення контрольованої класифікації, що дає змогу визначати площі ділянок із сухою та пошкодженою рослинністю.

Результати

Дослідження проведено на території Тухлянського лісництва, що розташоване у Сколівському районі Львівської області. Тухлянське лісництво входить до складу ДП “Славське лісове господарство”. За характером рельєфу ліси на території лісництва належать до гірських. [ДП “Славське лісове господарство”, 2013]. Перепади висот на ділянці – близько 500 м. Територія лісництва розташована у Східних Бескидах.

Загальна площа лісництва становить 4888 га. На рис. 2 показано межі Тухлянського лісництва з позначенням 27 ділянок, на яких виявлено засихання хвойних лісів (2007 рік).

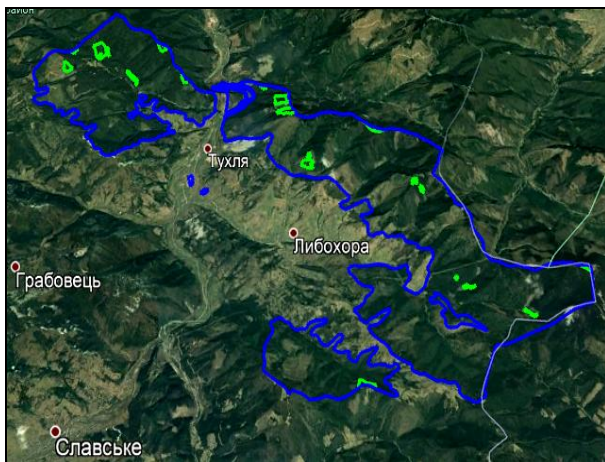


Рис. 2. Межі Тухлянського лісництва з позначеними ділянками засихання хвойних дерев

Для проведення польових досліджень здійснено три експедиції – у вересні 2017 р., червні 2018 р. та червні 2019 р. Під час експедицій виконано візуальні обстеження загального стану лісництва. На деяких ділянках виявлено повалені сухі дерева, які поросли чагарниками (рис. 3), також виявлено ділянки із сухою хвойною рослинністю (рис. 4).

Також виконано моніторинг хвойної рослинності за знімками із супутника Sentinel-2 на територію лісництва. Зокрема, у результаті аналізу серії знімків Sentinel-2 встановлено, що на семи ділянках здійснено вирублення сухоостою. На рис. 5 показано вирублення однієї

з ділянок площею близько 10 га, площа вирублення – приблизно 5 га.



Рис. 3. Ділянка із поваленими сухими хвойними деревами



Рис. 4. Ділянка із засиханням хвойних дерев



Рис. 5. Приклад вирублення ділянки із засиханням хвойних дерев: а – 2017 р.; б – 2018 р.

На рис. 6 показано повне вирублення двох ділянок із засиханням, також видно поширення засихання хвойних дерев за межами цих ділянок. Ці нові площі засихання також вирубали.

Під час останньої експедиції знято з безпілотного літального апарата дві ділянки, розташовані на різних висотах. Для знімання використано БПЛА Trimble UX5 HP із встановленою камерою Sony 7R. Фокусна відстань камери – 35 мм. Висота знімання – 645 м для

першої ділянки та 432 м – для другої. За параметрами знімання та характеристиками цифрової камери розраховано розрізнення для контрастних об'єктів на двох ділянках. Вони становлять 9 см для першої ділянки та 6 см – для другої. Така точність визначення планових координат поворотних точок ділянок із пошкодженою рослинністю дає змогу зробити висновок про можливість визначення площ тестових ділянок із високою точністю.

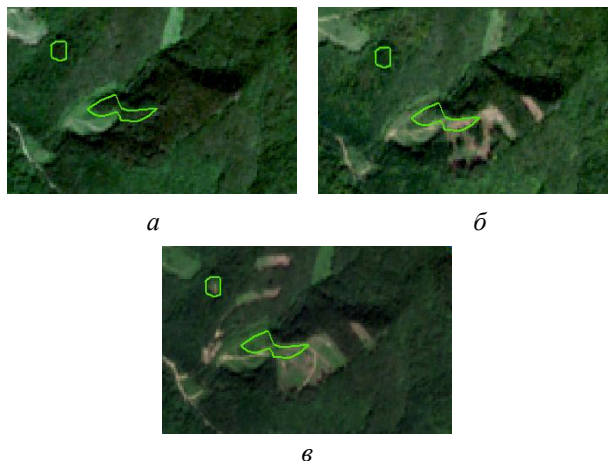


Рис. 6. Приклад поширення засихання хвойних дерев та вирублення ділянок: а – 2017 р.; б – 2018 р.; в – 2019 р.

Спроектовану траєкторію польоту показано на рис. 7. На рис. 8 зображено хмару точок, за якою створено ортофотоплан та центри знімків.

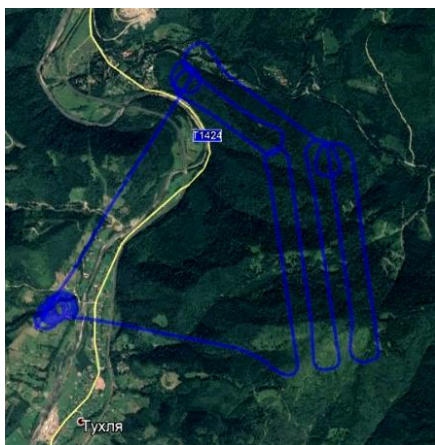


Рис. 7. Спроектована траєкторія польоту

За результатами знімання створено ортофотоплан, фрагмент якого наведено на рис. 9. Отримані дані використовують як завіркову інформацію для подальших досліджень.

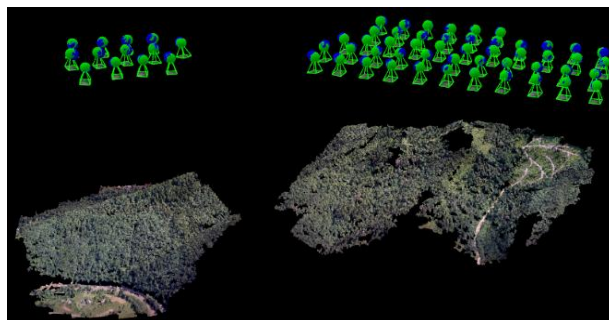


Рис. 8. Хмара точок та центри знімків для тестових ділянок



Рис. 9. Фрагмент створеного ортофотоплану

На ортофотоплані можемо розрізнити здорову, пошкоджену та суху рослинність (рис. 10).

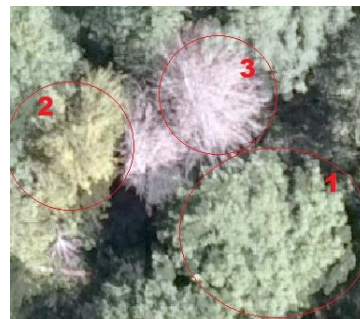


Рис. 10. Хвойна рослинність на ортофотоплані: 1 – здорова; 2 – пошкоджена; 3 – суха

З метою ефективного використання спектральних ділянок відбиття відібрано зразки різного типу хвойної рослинності. Для цього використано спектро радіометр ASD FieldSpec-3 FR. Дослідження виконано у державній установі “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”. Спектральний діапазон спектро радіометра ASD FieldSpec-3 FR становить 350–2500 нм; інтервал відліку – 1,4 нм у діапазоні довжин хвиль 350–1000 нм і 2,0 нм у діапазоні довжин хвиль 1000–2500 нм; спектральна розрізненість – 3,0 нм при 700 нм і 10 нм при 1400 нм і 2100 нм.

Спектрорадіометр ASD FieldSpec-3 FR має три складових давачі. Зазвичай використовують схему з трьома давачами для отримання кращих результатів і можливостей вибору діапазону користувачем. Всі ці три давачі – окремі спектрометри. Оптоволоконний кабель має оптоволоконні джгути, кожен із яких безпосередньо впаяний в спектрометр. У першому давачі використано нерухому виправлену відбивну голографічну дифракційну ґратку для діапазону 350–1050 нм і 512-елементну кремнієву фотодіодну лінійку з фільтром для оптимізації інтервалу здійснення вибірки, чутливості й температурної стабільності в цьому діапазоні довжин хвиль. У другому і третьому давачах використовують відбивальні голографічні дифракційні ґратки, встановлені з можливістю швидкого сканування і градієнтні InGaAs-фотодіоди з термоохолоджувачами і блокувальними фільтрами [Донец та ін., 2014].

На рис. 11 подано зразки хвойної рослинності різного типу, відібрані під час останньої експедиції.

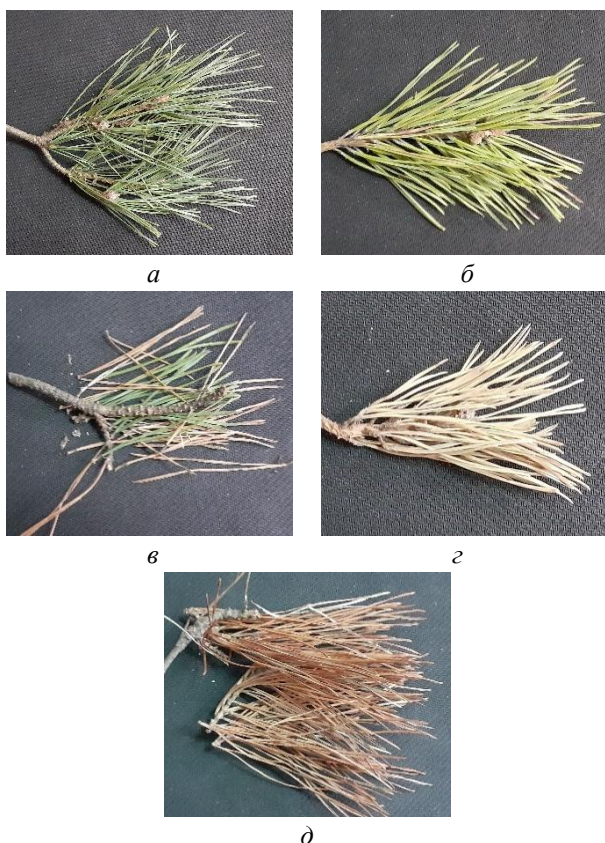


Рис. 11. Зразки відібраної хвойної рослинності:
а – 1 категорії (здорова); б – 2 категорії (ослаблена); в – 3 категорії (дуже ослаблена); г – 4 категорії (засихаюча); д – 5 категорії (свіжий сухостій)

Унаслідок спектрофотометрування отримано графік спектральних кривих для різних видів хвойної рослинності (рис. 12).

Аналізуючи графік спектральних кривих (рис. 12), встановлено, що ефективними для ідентифікації різних типів рослинності, крім ділянок на межі червоного краю, є ділянки в середньому інфрачервоному діапазоні (близько 1400–1900 нм). Як видно з графіку, здорова рослинність має найвищу відбивну здатність у діапазоні 700–1150 нм, від 1150 до 2400 нм найвище відбиття має повністю суха рослинність. Рослинність, яка засихає (2, 3, 4 категорії) не виказує різкої зміни спектрального коефіцієнта яскравості в ділянці червоного краю, а характеризується плавнішою кривою в ділянці 500–800 нм і за формою більше корелюється із ґрунтами. Середня ІЧ ділянка спектра відповідає за зміни вологості рослинності, а також зміни структури рослинного покриву та листків, а відбиття в ближньому ІЧ діапазоні залежить лише від внутрішньої структури листка і не залежить від насиченості водою. Тому спільне використання цих двох діапазонів спектра збільшить точність визначення вологості рослин [Ceccato, et. al., 2001].

Після аналізу літератури [Сидельник та ін., 2018; Зацерковний та ін., 2017, Кохан, Востоков, 2009] та враховуючи особливості отриманих спектральних кривих для різних типів хвойної рослинності, вибрано вегетаційні індекси, які дають змогу ідентифікувати хвойні насадження. Обрані вегетаційні індекси наведено у табл. 2.

На рис. 13 наведено індексні зображення, отримані за знімком із супутника GeoEye-1, а саме NDVI (а), WDRVI (б), PSRI (в) та EVI (г). Застосування двох інших індексів, а саме NDWI та DMCi залежне від середнього інфрачервоного діапазону. Їх можна використовувати для опрацювання знімків із супутників, знімальні системи яких дають поканальну інформацію у цьому діапазоні.

Для поліпшення інтерпретаційних можливостей індексних зображень, створено синтезоване зображення за трьома вегетаційними індексами – NDVI, WDRVI та PSRI (рис. 14). Аналізування отриманого

зображення дає змогу зробити висновок про чітку ідентифікацію сухої рослинності (синій колір), а також чітко розрізняється здорова хвойна та листяна рослинність. Для порівняння

на рис. 15 отримано синтезоване зображення із каналів NIR, RED та GREEN, що часто використовують для аналізу стану рослинності різних видів.

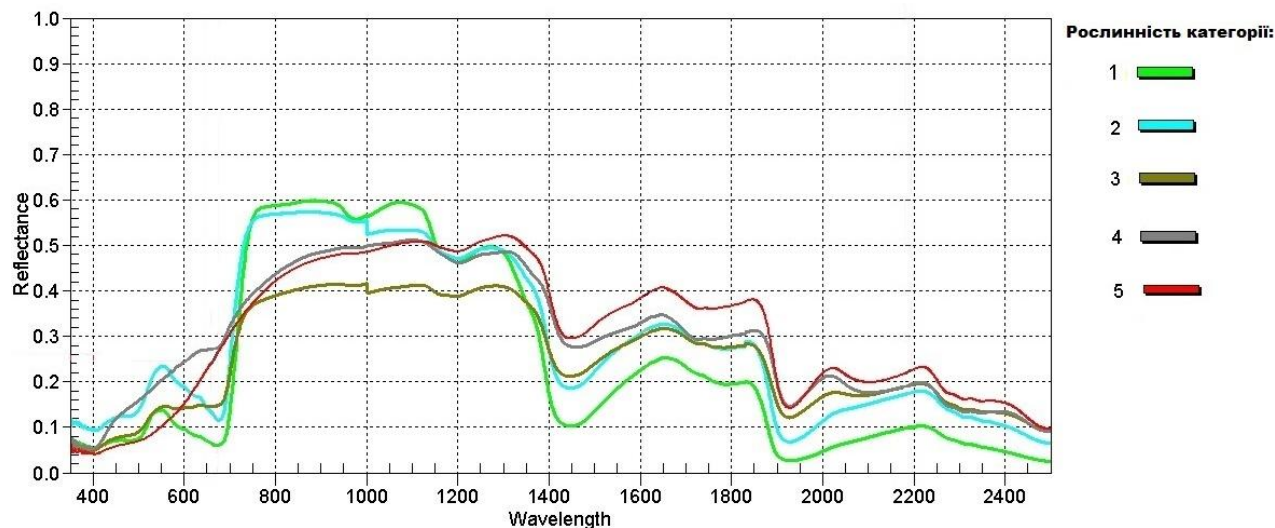


Рис. 12. Графік спектральних кривих для хвойної рослинності різних категорій

Таблиця 2

Вегетаційні індекси для виявлення сухої рослинності

Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + B_{RED}}$	Використовують для моніторингу загальної кількості рослинності. Чутливість до фонового відбиття дещо ускладнює використання цього індексу для визначення породного складу лісового покриву.
Enhanced Vegetation Index	$EVI = \frac{B_{NIR} - B_{RED}}{B_{NIR} + 6 \cdot B_{RED} - 7,5 \cdot B_{BLUE} + 1}$	Дає змогу виокремити більше градацій лісового покриву порівняно з NDVI, що дає переваги для моніторингу лісів. Вплив підстильної поверхні й атмосфери мінімізовано.
Wide Dynamic Range Vegetation Index	$WDRVI = \frac{0,1 \cdot B_{NIR} - B_{RED}}{0,1 \cdot B_{NIR} + B_{RED}}$	Модифікація індексу NDVI. Використовують для підвищення точності під час аналізування рослинності.
Normalized Difference Water Index	$NDWI = \frac{B_{NIR} - B_{SWIR}}{B_{NIR} + B_{SWIR}}$	У разі пошкоджень лісової рослинності найчастіше відбувається їх повна загибель, рослинність різко втрачає вологу і в'яне, тому використовують спектральний індекс, що враховує вологість рослин – водний індекс.
Plant Senescence Reflectance Index	$PSRI = \frac{B_{RED} - B_{GREEN}}{B_{NIR}}$	У сухих та пошкоджених насадженнях збільшується кількість огрубілого вуглецю, що можна врахувати індексом PSRI: використовують для загального оцінювання сухої та мертвої рослинності.
Dry Matter Content Index	$DMCI = \frac{B_{SWIR3} - B_{SWIR2}}{B_{SWIR3} + B_{SWIR2}}$	За наявності пошкодженої лісової рослинності відбувається порушення водного балансу і утворення сухих ділянок. Індекс сухості використовують для визначення стресового стану рослинності.

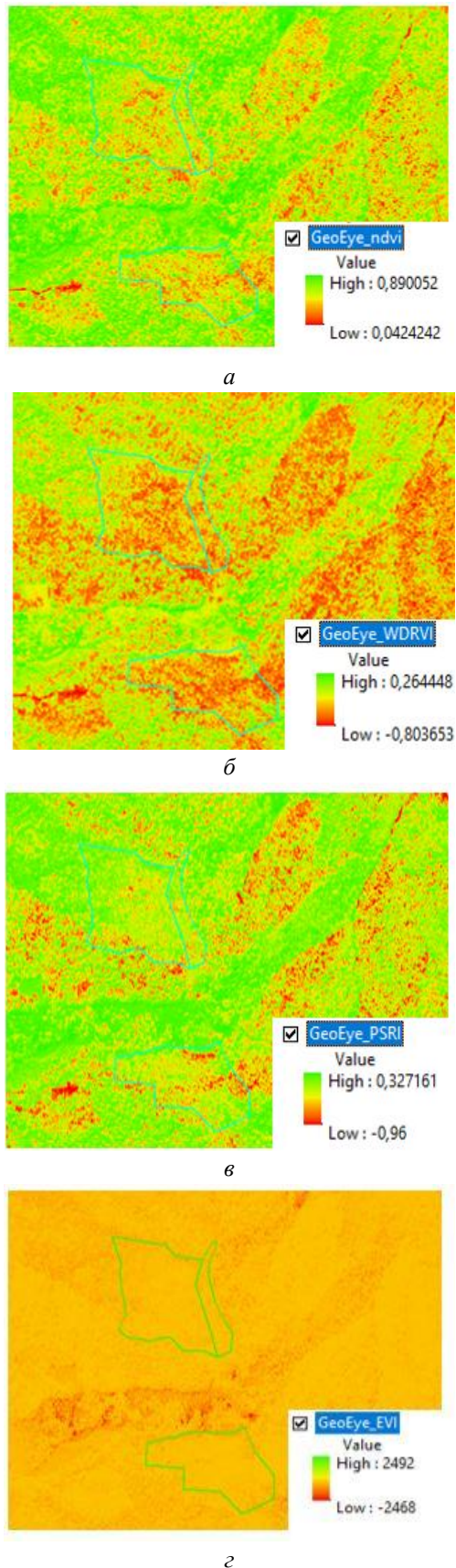


Рис. 13. Отримані зображення за вегетаційними індексами: а – NDVI; б – WDRVI; в – PSRI; г – EVI

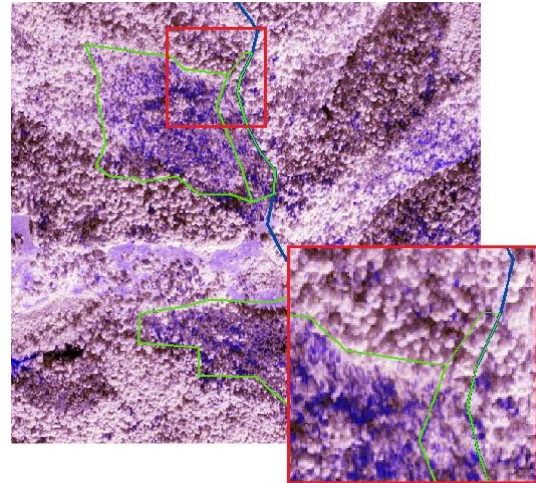


Рис. 14. Композитне зображення із BI NDVI, WDRVI і PSRI

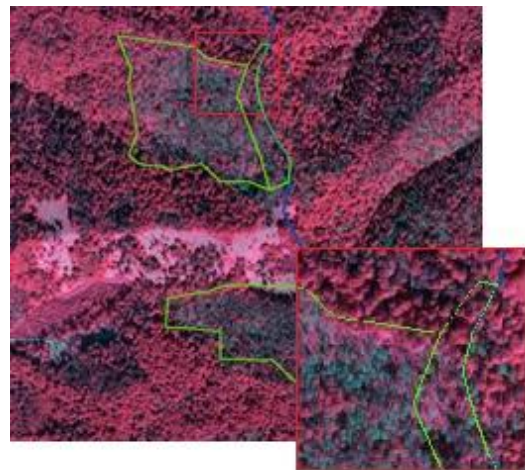


Рис. 15. Синтезоване зображення із каналів NIR, RED і GREEN

Для визначення площ ділянок із пошкодженою хвойною рослинністю виконано контрольовану класифікацію за методом максимальної вірогідності [Бурштинська та ін., 2016; Burshtynska et al., 2014] для синтезованого та композиційного індексного зображення.

Класифікацію за методом максимальної вірогідності виконують за формулою (1):

$$D = \ln(a_m) - \left[0.5 \ln(|COV_m|) \right] - \left[0.5 (X - M_m)^T (COV_m^{-1}) (X - M_m) \right] \quad (1)$$

де D – вагова відстань (вірогідність); a_m – відсоток вірогідності належності класифікованого пікселя до класу m (дорівнює 1.0 або вводять на основі апріорних даних); COV_m – коваріаційна матриця пікселів у сигнатурах класу m ; COV_m^{-1} – обернена матриця

до COV_m ; T – знак транспонування матриці [Шпак, 2012].

Щоб оцінити точність вибрано 10 осередків засихання на двох тестових ділянках та визначено їх площі на ортофотоплані (рис. 16).

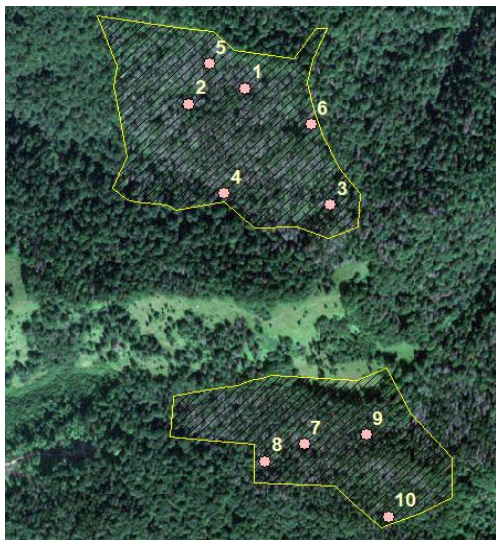


Рис. 16. Тестові ділянки для оцінювання точності

Також визначено площі цих 10 тестових ділянок за синтезованим зображенням та за

композиційним індексним зображенням. Результати подано у табл. 3.

Аналізування результатів визначення площ з використанням композиційного зображення за вегетаційними індексами NDVI, WDRVI, PSRI вказує на високу достовірність (87–98 %), аналізування синтезованого зображення вказує на достовірність 76–96 %. На ідентифікацію меж ділянок із засиханням за синтезованим зображенням більший вплив має підстильна поверхня та спектральна яскравість сусідніх лісових об'єктів.

Наукова новизна та практична значущість

Наукова новизна полягає в опрацюванні методики виявлення пошкодженої та здорової хвойної рослинності на території Прикарпатського регіону. Теоретичною основою слугують спектрометричні дослідження здорової та пошкодженої рослинності, що дає можливість обґрунтувати вибір спектральних ділянок для максимально ефективного розділення різних типів хвойної рослинності та вибір вегетаційних індексів для їх ідентифікації.

Таблиця 3

Оцінювання точності отриманих результатів

№	Test	GeoEye (NDVI-WDRVI-PSRI)	GeoEye (NIR-RED-GREEN)	Test – GeoEye (NDVI-WDRVI-PSRI)		Test – GeoEye (NIR-RED-GREEN)	
	Area, m ²	Area, m ²	Area, m ²	Differ, m ²	Accuracy, %	Differ, m ²	Accuracy, %
1	1510	1428	1784	82	95	274	82
2	813	724	952	89	90	139	83
3	380	392	360	12	97	20	94
4	450	444	468	6	98	18	96
5	130	112	164	18	87	34	76
6	142	136	168	6	96	26	82
7	1000	980	1024	20	98	24	98
8	602	584	644	18	97	42	93
9	135	128	144	7	95	9	93
10	95	92	112	3	97	17	83

Опрацьована методика використання даних дистанційного зондування для ідентифікації пошкодженої та здорової рослинності допомагає виявляти не лише сухостій та здорову рослинність, а й таку, що належать до 2, 3 та 4 категорій. Це

сприятиме своєчасному вирубуванню таких дерев, що дасть змогу не лише зберегти здоровий ліс від подальшого розповсюдження шкідників, а й отримати деревину, яку ще можна використати в деревообробній галузі.

Публікацію фінансує Польське національне агентство з питань академічного обміну за програмою Міжнародних академічних партнерств з проекту “Організація 9 Міжнародної науково-технічної конференції “Інженерія довкілля, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку”.

Висновки

1. На підставі опрацювання космічних зображень середнього та високого розрізнення з використанням знімків з БПЛА розроблено методику, яка дає змогу визначати ділянки місцевості з пошкодженою та здоровою хвойною рослинністю.

2. Безпілотне знімання рекомендовано використовувати для вибору тестових ділянок, що дає можливість визначати з високою достовірністю площі засихання та встановлювати ступінь пошкодження хвойної рослинності.

3. Аналіз отриманих спектральних кривих, отриманих методом спектрофотометрування зразків відібраної хвойної рослинності дає змогу здійснювати вибір оптимальних спектральних каналів з метою визначення відповідних типів вегетаційних індексів та створення композиційних індексних зображень.

4. Виконана контрольована класифікація на 10 осередках для визначення площ засихання хвойної рослинності за композиційним індексним та синтезованим зображеннями вказує на вищу достовірність результатів (87–98 %), отриманих із використанням індексного зображення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бардиш Б., Бурштинська Х. Використання вегетаційних індексів для ідентифікації об'єктів земної поверхні. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2014. Вип. II (28). С. 82–88.
- Бурштинська Х., Денис Ю., Мадяр Ю., Полішук Б. Методика двоетапної класифікації лісів за космічними зображеннями високого розрізнення, *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 2016. Вип. 1. С. 148–155.
- Державне агентство лісових ресурсів України. URL: <http://dklg.kmu.gov.ua>
- Донец В. В., Броварець А. А., Бровченко В. В. Анализ особенностей полевой спектральной аппаратуры. *Космична наука і технологія*, 2017. Вип. № 3. С. 49–63.
- ДСП “Львівлісозахист”. URL: <https://lvivlisozahyst.co.ua/>
- Зацерковний В., Оберемок Н., Ягорлицька К. Застосування технологій ГІС і ДЗЗ в задачах моніторингу лісових ценозів. *Наукові технології*, 2017. Вип. № 4 (36). С. 350–357.
- Кохан С. С., Востоков А. Б. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи: підручник. 2009. К.: Вища школа. 511 с.
- Крылов А. М., Соболев А. А., Владимиров Н. А. Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat. *Лесной вестник*, 2011. Вип. 4. С. 54–60.
- Сидельник Н. Я., Пушкин А. А., Ковалевский С. В. Картирование поврежденных лесных насаждений и объектов лесохозяйственных мероприятий с использованием материалов космической съемки и ГИС-технологий. *Труды БГТУ*, 2018. Вип. № 1. С. 5–12 (in Russian).
- Станкевич С. А., Титаренко О. В., Шкляр С. В. Ефективна обробка даних польового спектрометрування в природоресурсних задачах. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 2010. Вип. № 12. С. 110–115.
- Черепанов А. С., Дружинина Е. Г. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. *Геоматика*, 2009. Вип. № 3. С. 28–32 (in Russian).
- Черепанов А. С. Вегетационные индексы. *Геоматика*, 2011. Вип. № 2. С. 98–102 (in Russian).
- Шпак А. Порівняльний аналіз методів класифікації лісів гірської місцевості за матеріалами знімання супутника RapidEye. *Вісник Астрономічної школи*, 2012. Том 8 (№ 2). С. 212–216.
- Bochenek, Z., Ziolkowski, D., Bartold, M., Orłowska K. and Ochtyra A. Monitoring forest biodiversity and the impact of climate on forest environment using high-resolution satellite images. *European Journal of Remote Sensing*, 2017. Vol. 51, pp. 166–181.
- Burshtynska K., Polishchuk B. and Madyar J. The definition of the area of felling forests by high resolution satellite images. *GLL*, 2014. No.3, pp. 43–54.
- Ceccato, P., Flasse, S., Tarantola, S., Jacquemond, S. and Gregoire, J. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment*, 2001. Vol. 77, pp. 22–33.
- Franklin S. E., Wulder M. A., Skakun R. S. and Carroll A. L. Mountain pine beetle red attack forest damage classification using stratified Landsat TM data in British Columbia, Canada. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2003. № 69(3), pp. 283–288.

- Katz Ch. Small Pests, Big Problems: The Global Spread of Bark Beetles. 2017. URL: <https://e360.yale.edu/features/small-pests-big-problems-the-global-spread-of-bark-beetles>.
- Kumar D. Monitoring Forest Cover Changes Using Remote Sensing and GIS: A Global Prospective. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2011. Vol. 5, pp. 105–123.
- Sherbinin A., Carr D., Cassels S. and L. Jiang. Population and environment. *Annual Review of Environment and Resources*, 2007. Vol. 32, pp. 34–373.
- Trigg S. N., Curran L. M. and McDonald A. K. Utility of Landsat 7 satellite data for continued monitoring of forest cover change in protected areas in southeast Asia. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 2006. Vol. 27, pp. 49–66.

KH. BURSHTYNSKA¹, YU. PETRYK¹, B. POLISHCHUK¹, YE. SHYLO²

¹ Department of photogrammetry and geoinformatic, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine, e-mail: yuliya.denys@gmail.com

² Department of engineering geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery Str., Lviv, 79013, Ukraine.

MONITORING OF CONIFEROUS FOREST DRYING IN PRECARPATHIAN REGION USING REMOTE SENSING DATA

Purpose. The aim of this research is monitoring of coniferous forests of Tukhlya forestry in Precarpathian region using medium and high resolution satellite images and images obtained from an unmanned aerial vehicle (UAV).

Methodology. To monitor the condition of forests of Tukhlya Forestry, a technique based on using satellite images with different spectral characteristics and resolutions, images obtained from UAVs and, accordingly, their processing by different methods, was used. To substantiate the methods of further image processing and to develop effective approaches to the identification of areas with coniferous trees drying, spectrophotometric measurements of healthy and damaged coniferous vegetation were carried out. The analysis of the obtained spectral curves made it possible to select the appropriate ranges of the electromagnetic spectrum for the identification of damaged and dry vegetation. The research is based on using high and medium resolution satellite images, obtained from GeoEye-1 and Sentinel-2. Unmanned aerial vehicle surveying was used to obtain validation information and to analyse the obtained results.

Results. Researches were conducted in the territory of Tukhlya forestry, Skole district, Lviv region. Three expeditions were carried out for field research. During the last expedition, surveying from the unmanned aerial vehicle were conducted for two test sites. For efficient using of spectral reflectance ranges, samples of different coniferous vegetation types were selected for spectrophotometric measurements. The analysis of the obtained spectral curves was used to select the vegetation indices that allow identification of damaged and healthy vegetation. To improve the interpretation capabilities of index images, a synthesized image from three vegetation indices was created. Controlled classification by maximum likelihood method was performed to determine the areas of sites with damaged coniferous vegetation. The obtained results were then analysed. **Scientific novelty and practical significance.** The scientific novelty is processing of the methods for detection of damaged and healthy coniferous vegetation in the territory of the Carpathian region. Spectrometric measurements of healthy and damaged vegetation are the theoretical basis, which makes it possible to substantiate the choice of spectral ranges for the most efficient separation of different types of coniferous vegetation and the choice of vegetation indices for their identification. The developed methodology of using remote sensing data for identification of damaged and healthy vegetation allows to detect not only dry and healthy vegetation, but also damaged vegetation. This will contribute to the timely cutting of such trees, which will not only save the healthy forest from further spread of pests, but also obtain wood that can still be used in the wood industry.

Key words: forest monitoring, drying of coniferous forests, remote sensing, satellite images, vegetation indices, classification.

Надійшла 29.09.2019 р.