

УДК 528.8:632

## Космічний моніторинг довкілля — ефективний механізм охорони лісів

В. І. Лялько, Г. М. Жолобак, А. Я. Ходоровський, О. А. Апостолов\*, О. М. Сибірцева, Л. О. Єлістратова, І. Ф. Романчук, Є. М. Дорофей

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, Київ, Україна

Проведена класифікація гірських лісів Карпатського національного природного парку (КНПП) з метою уточнення просторового розподілу їх породного складу та фітосанітарного стану. Встановлено, що площа листяних лісів відносно хвойних на цій території Карпат постійно збільшується. Досліджені фактори ураження ялиників Карпат та встановлено, що пошкоджені ділянки лісу розташовуються переважно на ділянках пониженого рельєфу. Проаналізовано фітосанітарний стан окремих ділянок лісів на підставі даних з супутника Sentinel-2 та виявлено суттєву відмінність у величині показників яскравості та значень вегетаційних індексів NDVI та MSI між ураженими та здоровими ділянками.

**Ключові слова:** ліси, шкідники, короїд, Карпатський національний природний парк, дистанційні методи дослідження Землі, Landsat-8, Sentinel-2.

© В. І. Лялько, Г. М. Жолобак, А. Я. Ходоровський, О. А. Апостолов, О. М. Сибірцева, Л. О. Єлістратова, І. Ф. Романчук, Є. М. Дорофей. 2019

### Актуальність дослідження

Глобальні кліматичні зміни та їх вплив на навколишнє середовище — одна з актуальних міжнародних проблем, що обговорюється на найвищих міжнародних наукових і політичних рівнях. Негативні наслідки цих змін потребують невідкладного прийняття відповідних заходів. У зв'язку з цим в Україні прийнято закон “Про оцінку впливу на довкілля” від 23.05.2017 р. [4]. Особливо важливу роль у подоланні трансформації екосистем, викликаних змінами клімату Землі, відіграють ліси.

Ліси України, котрі, хоча і займають суттєво меншу площу, ніж в інших країнах Європи (на загал 15.7%), мають значний вплив на трансформацію природних ландшафтів. В останні роки в Україні значно збільшилися площі лісів, пошкоджені різними хворобами та шкідниками. Якщо уражені площі в 2000 р. займали 4% усієї території, то в 2011 р. вони зросли в два рази [11]. Зважаючи на швидке поширення фітопатологічних змін, для збереження існуючого лісового генофонду країни вкрай потрібно оперативно контролювати розвиток цих процесів у лісах. Як відомо, ефективно боротися з нападами шкідників та збудників хвороб можливо лише на початкових стадіях їхнього розвитку.

Таким чином, в сучасних умовах для реалізації сталого розвитку нашої держави слід визнати актуальним і важливим всебічне дослідження стану лісових екосистем України в глобальному і регіональному масштабах. Дослідження необхідно проводи-

ти оперативно, на значних площах. Особливу увагу слід приділяти виявленню ділянок з початковими стадіями формування небезпечних екологічних процесів, контролю за направленістю та інтенсивністю їх розвитку в часі. Для цього дослідження слід проводити в режимі моніторингу та на значних площах, що можливо виконати тільки на підставі використання космічних знімків. Зараз, згідно з чинними інструкціями, лісники під час лісопатологічних обстежень здійснюють контроль території лісів на предмет ураження різноманітними шкідниками на окремих площах лише оглядаючи ліси [3].

Серед процесів патогенного винищення лісів провідне місце займає явище широкого розповсюдження жуків-короїдів, що розповсюджуються не тільки в Україні, але і в лісах багатьох країн світу. За даними [10] жук короїд — типограф (*Ips typographus* L.) завдав більшої шкоди лісам Європи, ніж усі інші природні процеси разом.

Урагани та снігопади в Європі та Північній Америці призвели до загибелі значної кількості дерев, які були заселені короїдами та сприяли їхньому розповсюдженню. Найчастіше короїди заселяють ліси, які потерпають від посухи, ураганного вітру, підвищення або зниження рівня ґрунтових вод, пожежі, посиленого рекреаційного навантаження, пошкодження комахами-хвоєлистогризами, ураження хворобами, а також ослаблені в результаті проведення господарських заходів.

Підвищення температури навколишнього середовища призводять до засух, які збільшують масштаби зараженості короїдами. При цьому зростають за розмірами популяції жуків, прискорюють-

\* E-mail: alex@casre.kiev.ua, тел. 0664499013, +380 239-74-15

ся вихід гусениці з яйця [10]. З метою контролю за розповсюдженням жуків та їх знищенням необхідна оперативна інформація про початкові стадії зараження лісів цими шкідниками. На початковій стадії зараження (так звана “зелена” атака) гусінь жука розвивається у внутрішньому лубі дерева, яке фізіологічно зелене та живе, хоча перші ознаки стресу фіксуються у ближньому інфрачервоному (БІЧ) діапазоні і не спостерігаються людським оком. Запобіжні заходи потрібно приймати до того, як комахи почнуть мігрувати.

Візуальними ознаками ураження лісів короїдом є наявність деревинної трухи, розрідження крони дерев, пошкодження стовбурів; жовтуватий колір хвої; засохлі гілки; темно-бурі ризоморфи, біла плівка міцелію та таке інше [8].

Контроль за розповсюдженням короїдів традиційними методами на значній за розмірами площі потребує багато часу та зусиль. Щоби провести такі роботи, особливо у важко доступних районах, до яких в Україні відносяться карпатські ліси, слід обмежити площу проведення цих заходів шляхом попереднього виявлення пошкоджених лісів, використовуючи оперативні методи дослідження. До таких методів відносяться дистанційні дослідження за матеріалами космічної зйомки. Лісники вже давно застосовують матеріали аерофото зйомки та космічної зйомки, але можливості дистанційних матеріалів вони використовують не в повній мірі.

Як відомо, в наш час відбувається стрімкий ріст якості космічної знімальної техніки — збільшується кількість та зменшується ширина спектральних каналів, в яких виконується зйомка, збільшується частота її проведення, розширюються діапазони електромагнітних хвиль, що застосовуються для знімання. Все це значно розширює можливості використання дистанційних матеріалів для дослідження лісів та навколишнього середовища. Для реалізації цих можливостей необхідна розробка відповідних методик обробки космічних знімків [1].

У практиці лісового господарювання спостереження за станом лісів проводяться переважно наземними методами. На даний час вдосконалення спостережної системи йде в напрямку освоєння нових технологій інвентаризації лісів (використання таких інструментів, як лазерні далекоміри, електронні висотоміри, електромагнітні компаси, супутникові навігаційні системи, електронні мірні вилки, польові комп’ютери). І лише наступним кроком слід очікувати впровадження дистанційних технологій, оскільки вони забезпечують спрощення інвентаризаційних робіт, здешевлюють їх, практично унеможливають вплив суб’єктивних факторів та дозволяють охопити моніторингом більші площі за короткий проміжок часу. Для впровадження дистанційних технологій потрібно вирішити широкий комплекс методичних питань. На жаль, в Україні

досі не розроблено державної програми аерокосмічного моніторингу лісів.

Оперативне вирішення задач моніторингу стану лісів України можливе за матеріалами багатозональних космічних зйомок. Як відомо, багатозональна космічна зйомка з супутника Landsat виконувалася безперервно з 70-х років XX ст. і покривала більшу частину території планети. Усі ці матеріали розповсюджуються безкоштовно і доступні всім зацікавленим споживачам. Їх використання дозволяє проводити дослідження екологічного стану лісів в режимі моніторингу.

Значний прогрес в застосуванні матеріалів багатозональної космічної зйомки для дослідження лісових масивів України розпочався в нашій державі з середини 1990-х рр., коли відбувся стрімкий поступ в розвитку геоінформаційних систем з появою персональних комп’ютерів. Розвиток комп’ютерних технологій, які дозволили проводити обробку даних дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), що представлені в цифровій формі, обумовив появу нового і дуже ефективного методу проведення просторового аналізу поверхні Землі.

Одними з перших багатозональні знімки різної просторової розрізненості для вивчення екологічного стану лісів та інших ландшафтів застосовували фахівці Наукового Центру аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України (ЦАКДЗ) [16].

### Результати досліджень

Фахівці Центру, вивчаючи знімки супутників Landsat-5 та Spot-4 у межах зони відчуження Чорнобильської АЕС, розробили класифікацію лісів за їхнім складом, дослідили встановити вплив радіонуклідного забруднення на стан хвойних лісів. Було встановлено значні розбіжності у спектральних характеристиках соснових лісів до та після надзвичайних подій на Чорнобильській АЕС, а також функціональна залежність між вмістом радіонуклідів у ґрунті та спектральними характеристиками соснових лісів. Використовуючи встановлену залежність, була проведена оцінка ступеня забруднення лісів Зони відчуження радіонуклідами і складена відповідна карта. Співробітники ЦАКДЗ встановили, що ліси зони ЧАЕС, які вражені сосновим шовкопрядом, кореневою губкою, зазнали впливу пожеж та підтоплення (що було виявлено лісниками), за спектральними характеристиками відрізняються від здорових лісів. Використовуючи встановлені залежності, були виявлені площі, пошкоджені сосновим шовкопрядом, які раніше були невідомі лісникам. Отримані результати були підтверджені наступними наземними спостереженнями [6].

У подальшому співробітники ЦАКДЗ проводили регіональні дослідження лісів Середнього Сибіру. Були складені карти видового складу лісів, встановлено вплив теплового поля Землі на ліси [5].

У 2005 році фахівці ЦАКДЗ розпочали дослідження у межах Карпатського національного природного парку (КНПП). Використовуючи значний об'єм наявних наземних спостережень та дистанційних матеріалів у межах КНПП, були зроблені методичні розробки для вирішення екологічних проблем лісів. Розроблено системний підхід до визначення видового складу, фітосанітарного стану, забезпечення збалансованого розвитку лісового господарства країни, спрямованого на посилення екологічних та соціально-економічних функцій лісів на прикладі КНПП. Для цього були використані космічні знімки супутників Landsat, Sentinel-2 та інші. На загал, вирішувалися наступні завдання: вдосконалення методів обробки космічної інформації для виявлення змін довкілля; проведення класифікації лісів за видовим складом в межах КНПП; визначення фітосанітарного стану лісів; розрахунок первинної нетто-продуктивності NPP (Net Primary Production) лісів за даними космічної зйомки; підготовка рекомендацій для поліпшення охорони, утримання, збереження та відновлення лісових екосистем та використання лісових ресурсів.

Досвід використання матеріалів космічних зйомок для вирішення подібних задач відображено в публікаціях співробітників Центру [3, 5–7].

### Матеріали та методика досліджень

Для дослідження КНПП були використані матеріали космічної зйомки з супутника Landsat. Розрізняльна здатність знімків 30 метрів, що дозволяє вести дослідження на рівні деревостанів. Крім знімків були використані топографічні карти масштабу 1:100000, топографічна карта КНПП масштабу 1:150000, цифрова модель рельєфу (ЦМР), дані лісотаксаційної зйомки території КНПП та польові спостереження співробітників ЦАКДЗ восени 2017 року. Для обробки зібраної інформації було застосовано програмне забезпечення *Erdas Imagine* та *GIS-MapInfo Professional*.

Зібрана нами первинна інформація була отримана в різних системах координат: космічні знімки в системі UTM/WGS84 в метрах, топографічні карти створені в системі Гаусса–Крюгера/Пулково 1942 в метрах та ЦМР в системі Geographis в градусах. Тому наступним кроком став вибір системи координат, до якої треба привести всі наявні матеріали та в якій будуть виконуватись усі розрахунки. Такою системою була обрана система координат UTM/WGS84 зона 35. Це обумовлено тим, що майже вся космічна інформація отримується в такій системі координат, крім того, всі програми по роботі з космічними даними завжди чітко “розуміють” цю систему і правильно її відображають, на відміну від системи Гаусса–Крюгера/Пулково, 1942. Щоб всі дані привести до

єдиної системи координат, ми застосували геометричну корекцію до тих даних, які просторово не збігаються одні з одними. За базові знімки, до яких проводилась геометрична корекція, ми брали космічні знімки Landsat, оскільки вони мають чітку збіжність між собою та з топографічними картами.

### Класифікація навколишнього середовища КНПП

З метою класифікації навколишнього середовища окрім яскравості елементів довкілля у 9 спектральних каналах супутника Landsat-8, які встановлювалися за знімками, ми використовували відомі вегетаційні індекси NDVI (*normalized difference vegetation index*) [17] та NWI (*normalized water index*) [9].

Інтегральний показник, який характеризує стан рослинного покриву і підвищує ефективність встановлення його складу NDVI:

$$NDVI = (NIR(5) - RED(4)) / (NIR(5) + RED(4)). \quad (1)$$

Водний індекс, який характеризує забезпеченість водою рослин NWI:

$$NWI = (GREEN(3) - SWIR1(6)) / (GREEN(3) + SWIR1(6)). \quad (2)$$

Для врахування висотної поясності в розташуванні рослинності була використана цифрова модель рельєфу, що характеризує висотне розташування рослинності.

Таким чином для класифікації довкілля за даними з супутників Landsat-8 було сформовано дванадцятиканальне зображення, де: 1–9 канали відповідають спектральним яскравостям у цих каналах супутника Landsat-8, 10 канал — значення індексу NDVI (за формулою 1), 11 канал — значення індексу NWI (за формулою 2), 12 канал — висота рельєфу за цифровою моделлю рельєфу (ЦМР).

Для проведення класифікації та оцінки достовірності отриманих результатів досліджень ми використовували лісотаксаційну карту КНПП та матеріали польових спостережень співробітників ЦАКДЗ, що були зроблені у межах Карпатського парку в період польових робіт.

Класифікацію довкілля в межах території парку ми виконували з допомогою програмного продукту ERDAS Imagine, що дозволяє проводити класифікацію різними методами з використанням інтерактивного засобу «навчання». Інтерактивний засіб «навчання» контролюється безпосередньо дослідником. При цьому ми проводили вибір пікселів, які характеризують собою певний клас довкілля з використанням лісотаксаційних та топографічних карт.

## Виклад матеріалу

Як доведено багаторічною практикою, не існує найкращого універсального методу або методики класифікації. Кожен конкретний випадок, як правило, потребує власного підходу, який встановлюється в результаті проведення досліджень. У більшості випадків задачу можливо вирішити навіть кількома способами, які будуть мало поступатися один одному за точністю.

Серед методів класифікації досить відомими є метод мінімальної відстані (Minimum Distance), метод відстані Махаланобіса (Mahalanobis Distance), метод максимальної вірогідності (Maximum likelihood). Проведене нами зіставлення результатів класифікації рослинного покриву КНПП з використанням різних методів класифікації, використовуючи знімок за 16 жовтня 2017 року, показало, що найкращі результати ми отримали при застосуванні методу мінімальної відстані (рис. 1).

Аналіз результатів класифікацій засвідчив, що:

1) Рослинність району розташована у вигляді смуг, які витягнуті в північно-західному напрямку згідно з простяганням геологічних структур та гірського рельєфу Карпат.

2) Серед хвойних лісів району переважають ялинові та соснові ліси. Ялинові ліси складають значні за розмірами масиви лісів, тоді як соснові ліси представлені переважно окремими лісовими масивами, відносно невеликими за площею. Ялицеві ліси зустрічаються по всій досліджуваній території.

3) Хвойні та листяні ліси нерівномірно розміщені на досліджуваній території. Широко розповсюджені на північному сході району букові ліси в центральній та південно-західній частинах території змінюються хвойними лісами, що обумовлено збільшенням абсолютних відміток рельєфу. З півночі на південь та південний захід серед лісової рослинності збільшується кількість ялинових лісів. Соснові ліси більш поширені на півночі та в центральній частині району і займають меншу площу на півдні району.

4) Букові ліси розміщуються на півночі території, де складають дві смуги північно-західного простягання, але вони розташовані переважно за межами КНПП. На решті території букові ліси займають невеликі площі на відносно понижених ділянках рельєфу.

5) Луки з трав'янистою рослинністю (луки зони лісів та передгір'я) розміщуються переважно уздовж долин річок. Впевнено виділяються на класифікації і площі, де відсутня деревинна рослинність, полонини (луки альпійського та субальпійського поясів), що розташовані на максимальних висотах рельєфу.

6) Для класифікації лісів у гірських районах слід використовувати знімки, котрі зроблені при максимальному куті падіння сонячних променів (в надир). Інакше значну частину території будуть займати темні тіні від гірських вершин, які при класифікації відносяться до класу "вода".

## Контроль за появою і поширенням шкідників та хвороб лісу

За даними Державного агентства лісових ресурсів України останнім часом спостерігається розмноження комах-ксилофагів, що шкодить сосновим насадженням на значних площах [2].

На рис.2 наведено розподіл виділів з різними факторами пошкодження: короїдом, кореневою губкою, раком ялиці та вітровалами у межах КНПП за 2015–2017 роки.

Аналіз розподілу виділів за факторами пошкодження, суміщений з цифровою моделлю рельєфу, дозволив зробити висновок, що ліси, заселені шкідниками, розташовуються переважно в місцях з пониженими значеннями висот. Крім того, на рисунку чітко простежується розташування пошкоджених виділів у вигляді смуг, які простягаються згідно з простяганням гір. Ділянки лісів з різними пошкодженнями розташовуються недалеко одна від одної.

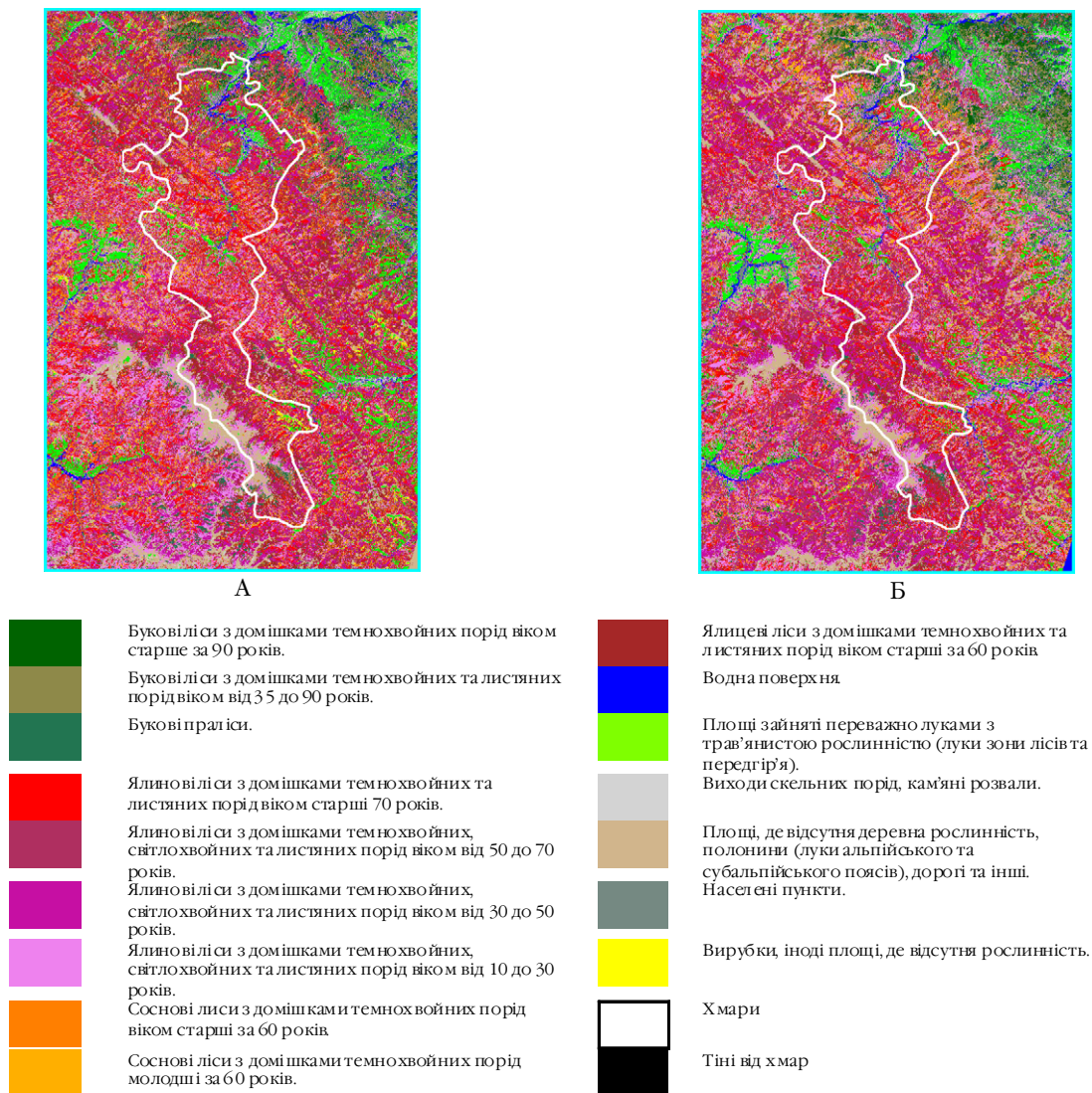
## Виявлення осередків ураження деревостанів КНПП за знімком з супутника Sentinel-2

Наявність жука-короїда у лісі легко ідентифікувати при наземних обстеженнях за наявністю смуг виділення смоли або висипання бурової муки. Розміри цих слідів недостатні для безпосереднього виявлення їх на космічних знімках. Але вже на початкових стадіях ураження окремих дерев змінюється колір листків та хвої. Проте, для виявлення захворювання окремих дерев знімки з супутника Landsat недостатньо детальні. Тому для пошуку ослаблених короїдами дерев були залучені знімки з супутника Sentinel-2 з просторовою розрізненністю 10 м, що відповідає розміру окремого дерева. Таким чином, використання знімків з супутника Sentinel-2 дозволяє перейти від досліджень на рівні деревостану до рівня окремого дерева. Але наземна інформація цього рівня досліджень відсутня.

Як відомо, при складанні лісотаксаційних карт пошкодженням вважається увесь виділ при наявності тільки окремих уражених дерев у межах виділу. Але там, поряд з пошкодженими деревами є та чи інша кількість здорових дерев. Тому для визначення значень вегетаційних індексів дерев, уражених шкідниками, перш за все потрібно відокремити їх від здорових дерев.

Виходячи з наведених вище даних про умови, сприятливі для розвитку шкідників, у якості вегетаційних індексів, що характеризують ці умови, були використані наступні індекси: NDVI, REP (*red edge position*) [13] та MSI (*moisture stress index*) [14, 15].

Для дистанційного виявлення осередків ялинових деревостанів КНПП, уражених короїдом, було



**Рис. 1.** Зіставлення результатів класифікації довкілля на базі космічного знімку Landsat 16.10.2017 року з використанням різних методів: А — результати класифікації методом мінімальної відстані (Minimum Distance); Б — результати класифікації методом максимальної вірогідності (Maximum likelihood)

проаналізовано розподіл значень вегетаційних індексів NDVI та REP в межах виділів, де було зафіксовано цього шкідника лісниками. Індекс рослинності NDVI характеризує поглинання світла молекулами хлорофілу та відбиття його клітинами мезофілу, а індекс REP залежить від сумарного вмісту хлорофілу, який є показником функціонального стану рослин. Підвищена концентрація хлорофілу переміщує позицію червоного краю у бік збільшення довжин хвиль.

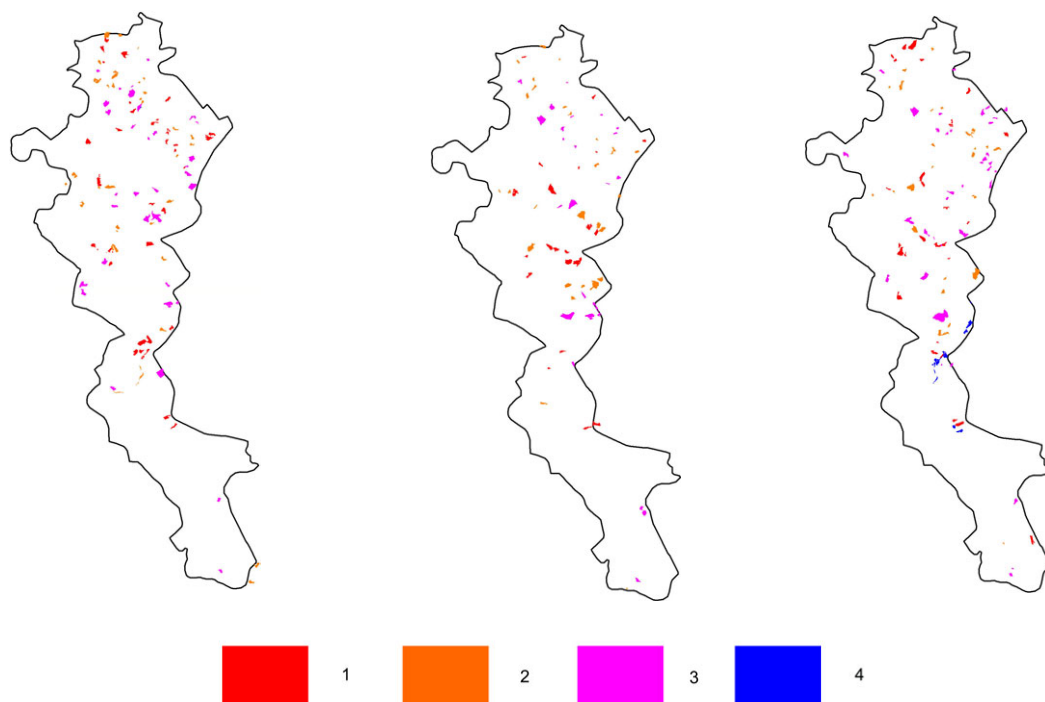
В результаті проведених досліджень встановлено, що рослини на ділянках, заселених короїдом, відзначаються пониженим рівнем значень NDVI. Це пов'язано з різним ступенем відсутності зелених органів, що містять хлорофіл, який поглинає промені червоної ділянки спектру. Коливання значень NDVI від 0.4 до 0.57 умовних одиниць (у. о.) відповідають ділянкам ялинових лісів, що вражені короїдом-типографом. Більш низькі значення NDVI (нижче 0.3 у.о.) вла-

стиві кам'янистим розсипам, ділянкам відкритого ґрунту і тому пікселі з такими значеннями індексу виключались з подальшого аналізу. Для здорових лісів характерні значення NDVI вище 0.6 у. о.

На тих же дослідних ділянках варіації значення REP перебувають в межах від 718 до 724 нм. Середні значення REP, що коливаються біля показника 720 нм, засвідчують некритичний стан обраних ділянок, проте такий, що відповідає наявності певних шкодочинних агентів. Наявність пошкоджених та сухостійних дерев може бути результатом діяльності не лише жуків-короїдів, але й інших несприятливих впливів. Тобто ми не отримуємо однозначного результату. Проте, зіставлення двох індексів надає відповідь на питання, чи відділяється здорова частина пологів лісу від ураженої.

Аналіз знімку Sentinel-2 від 01 вересня 2017 р. дозволив встановити вплив шкідників дистанційно через поєднання двох індексів NDVI та REP, які





**Рис. 2.** Розподіл виділів КНПП за факторами пошкодження: а) за 2015 рік, б) за 2016 рік, в) за 2017 рік

узгоджено змінювалися при наявності на досліджуваній території факторів ураження. У подальшому для підвищення достовірності та надійності отриманих результатів виявлення осередків ушкодження деревостанів варто було б використати кілька різночасових знімків цієї території.

Виходячи з умов, що сприятливі для розвитку короїдів, була спроба виявити проблемні ділянки з використанням індексу NDVI у комплексі з індексом водного стресу MSI, що вказує на нестачу вологи в рослинному покриві. Це показник розраховується за формулою простого співвідношення коефіцієнтів відбиття на довжинах хвиль середнього та ближнього інфрачервоного діапазонів (1 600 нм/820 нм). Індекс відношення MSI використовувався в роботах [12, 15], які досліджували стан здоров'я хвойного лісу за допомогою дистанційного зондування. Для сенсора Sentinel-2 це відповідає співвідношенню рівнів відбиття 11 та 8 каналів. Високі значення індексу MSI вказують на понижений вміст вологи в рослинному покриві. Дослідження в межах ділянок розвитку жуків-короїдів засвідчили, що середні значення вегетаційного індексу NDVI знаходяться в проміжку 0.55–0.60 у.о., а середні значення індексу MSI — в проміжку 0.82–1.19 у.о. (рис.3, табл. 1). Отримані дані допускають можливість існування на цих ділянках осередків заселення дерев жуками-короїдами на рівні так званої “зеленої” атаки.

У подальшому для більш поглибленого розуміння впливів чинників пошкодження на деревостани та їх відображення на супутникових

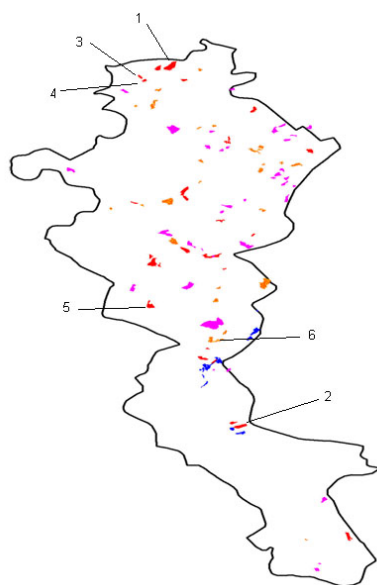
знімках необхідно вдосконалити підбір завіркових даних стосовно осередків ураження лісової деревини, картування та закріплення в натурі їх контурів та використовувати для дистанційного аналізу різночасові знімки проблемної території.

## Висновки

1. Із залученням матеріалів космічних зйомок досліджено лісові масиви Карпатського національного природного парку. На підставі аналізу космічних знімків Landsat за період з 1979 до 2000 рр. встановлено, що площа листяних лісів відносно хвойних на дослідженій території Карпат постійно збільшується.

2. На основі дванадцятиканального знімку, створеного на базі космічного знімку Landsat від 16.10.2017 р., проведена керована класифікація гірських лісів КНПП з метою уточнення просторового розподілу їх породного складу та фітосанітарного стану. Виявлено, що у межах гірських лісів найбільш вдало визначаються листяні ліси з перевагою бука (83%), хвойні ліси надійно відокремлюються від листяних (понад 80% випадків), легко ідентифікується рослинність на луках та вирубки різного віку, а також населені пункти, техногенні об'єкти у межах населених пунктів, хмари (100%).

3. Ділянки лісів, які пошкоджені різноманітними шкідниками (короїд, рак ялиці, коренева губка) та вітровалом складають окремі смуги. Пошкоджені



**Рис. 3.** Ділянки виділів КНПП, уражені короїдом у 2017 р., де зіставлялись значення NDVI та MSI

**Таблиця 1.**

Середні значення індексів NDVI (у.о.) та MSI (у.о.) для ділянок виділів КНПП з факторами ураження (№1-6) та ділянки здорового ялинового лісу (№7) у 2017 р.

№ ділянки	NDVI	MSI
1	0.585 ± 0.06	1.052 ± 0.11
2	0.568 ± 0.02	1.191 ± 0.18
3	0.543 ± 0.027	0.883 ± 0.026
4	0.590 ± 0.06	0.822 ± 0.2
5	0.602 ± 0.07	0.881 ± 0.04
6	0.548 ± 0.07	0.986 ± 0.12
7	0.742 ± 0.007	0.609 ± 0.02

ділянки розташовуються переважно в місцях з пониженими значеннями висот.

4. За допомогою зіставлення двох вегетаційних індексів NDVI та MSI для дослідження пікселів з довільно вибраних уражених ділянок виділів КНПП та пікселів здорового ялинового лісу на основі даних супутника Sentinel-2 проаналізовано фітосанітарний стан цих ділянок лісів дистанційними методами і виявлено суттєву відмінність у величині показників яскравості між ураженими та здоровими ділянками.

З позицій збереження природного біорізноманіття регіону є актуальним дистанційне вивчення особливостей динаміки зміни породного складу лісів та їх фітосанітарного стану як у межах Карпатського НПП, так і на інших територіях у межах України.

*Автори висловлюють подяку співробітникам Карпатського національного природного парку за надання можливості проведення польових досліджень в межах парку.*

## Література

1. Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування / В. І. Лялько та ін.; К.: Наук. думка, 2006. 357 с.
2. Держлісагентство запроваджує заходи для боротьби з масовим всиханням лісів. URL: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=183151&cat\\_id=32888](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=183151&cat_id=32888) (дата звернення: 17.12.2017).
3. Жолобак Г. М. Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 3. С. 56–64.
4. Закон України “Про оцінку впливу на довкілля” / Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 29, ст. 315. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19> (дата звернення: 17.12.2017).
5. Лялько В. І., Сахацький А. І., Ходоровський А. Я. Особливості моніторингу лісових масивів на основі використання матеріалів многозональної космічної зйомки (на прикладі лісових масивів України та Центральної Сибіри): *Третя Укр. конф. по перспективним косм. дослід.*: Сб. тез. Кацивели, Крим 2003. С. 212.
6. Лялько В. І., Азімов О. Т., Сахацький О. І., Ходоровський А. Я. Оцінка фітосанітарного стану лісових масивів на Правобережжі р. Прип'ять у зоні відчуження за матеріалами багатозональної космічної зйомки: *Міжнародна конференція. “15 років Чорнобильської катастрофи: Досвід подолання”*. Київ, 2001. Розд. 2. С. 137.
7. Лялько В. І., Попов М. О., Сахацький О. І., Жолобак Г. М., Ходоровський А. Я., Шпортюк З. М., Станкевич С. А., Козлова А. О., Сибірцева О. М., Апостолов О. А. Використання багатоспектральних супутникових даних для моніторингу стану рослинного покриву в межах територій природно-заповідного фонду України Полісся та Карпат (на прикладі Національного природного парку “Прип'ять-Стохід” та Карпатського національного природного парку): *Третя Всеукраїнська конференція “GEO-UA”*, (Євпаторія, 3–7 вересня 2012). К.: ІКИ НАНУ-НКАУ, 2012. С. 85–86.
8. Парпан В. І., Шпарик Ю. С., Слободян П. Я., Парпан Т. В., Коржов В. Л., Бродович Р. І., Криницький, Г. Т., Дебринюк Ю. М., Крамарець В. О., Чебан І. Д. Особливості ведення лісового господарства в похідних ялиниках Українських Карпат. *Наукові праці Лісівничої академії наук України: збірник наук. пр.* Львів: РВВ НЛТУ України. 2014. Вип. 12. С. 20–29.
9. Сахацький О. І. Методологія використання матеріалів багатоспектральної космічної зйомки для вирішення гідрогеологічних задач: автореф. дис. ... д-ра геол. наук: 05.07.12 / Державна установа “Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”. Київ, 2009. 38 с.
10. Abdullah, H., Skidmore, A. K., Darvishzadeh, R., & Heurich, M. (2018). Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. doi:10.1002/rse2.93.
11. Ensuring a sustainable future for forests: The case of Ukraine. IIASA POLICY BRIEF №18. 2018. URL: <http://>

www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/IASAPolicyBriefs/pb18-web\_3.pdf.

12. Havašová M., Bucha T., Ferencík J., Jakuš R. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Ann. For. Res.* 2015. V. 58, № 2. pp. 295–310. DOI: 10.15287/afr.2015.388
13. Horler D. N. H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. Journal of Remote Sensing*. 1983. V. 4, N 2. P. 273–288.
14. Hunt Jr, E. Raymond; Rock, Barrett N. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*. 1989. V. 30, № 1. P. 43–45.
15. Lausch A., Heurich M., Gordalla D., Dobner H.J., Gwilym-Margianto S., Salbach C. Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. *Forest Ecology and Management*. 2013. V. 308 P. 76–89.
16. Lyalko, V. I., Sakhatsky, A. I., Hodorovsky, A. J., Shportjuk, Z. M., Sibirtseva, O. N., Marek, K.-H., Oppitz, S. Monitoring of chernobyl disaster area using multitemporal satellite data. *International In: Archives of photogrammetry and Remote Sensing*. 1998. Vol. XXXII, Part 7, Budapest, pp. 726–730.
17. Rouse J. W., Haas Jr. R.H., Schell J. A., Deering D. W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC*. 1978-1. 1973. 93 p.
- Hodorovsky, A. J., Shportuk, Z. M., Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Sibirtseva, O. M., Apostolov, A. A. Use of multispectral satellite data for monitoring the state of vegetation within the territories of the nature reserve fund of Ukraine Polissia and the Carpathians (on the example of the National Nature Park Pripyat-Stokhid and the Carpathian National Nature Park). *Proc of Third All-Ukrainian Conference GEO-UA, (Evpatoria, September 3–7, 2012)*. Kiev: pp. 85–86. (Ukrainian).
8. Parpan, V. I., Shparik, Yu. S., Slobodyan, P. Ya., Parpan, T. V., Korzhov, V. L., Brodovich, R. I., Krinitskiy, G. T., Debrinyuk, Yu. M., Kramarets, V. O., Cheban, I. D. (2014). Features of forest management in the derivative springs of the Ukrainian. *Naukovi praci Lisivnychoyi akademiyi nauk Ukrayiny: zbirnyk nauk. pr. L'viv: RVV NLTU Ukrayiny*. V. 12, pp. 20–29. (Ukrainian).
9. Sakhatsky, O. I. (2009) Methodology of using multispectral space surveying materials for solving hydrogeological problems (Extended abstract of Doctor thesis). State Institution Scientific Center for Earth Aerospace Research of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv. Ukrainian. (Ukrainian).
10. Abdullah, H., Skidmore, A. K., Darvishzadeh, R., & Heurich, M. (2018). Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. doi:10.1002/rse2.93.
11. Ensuring a sustainable future for forests: The case of Ukraine. IASIA POLICY BRIEF. no.18. 2018. Retrieved from [http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/IASAPolicyBriefs/pb18-web\\_3.pdf](http://www.iiasa.ac.at/web/home/resources/publications/IASAPolicyBriefs/pb18-web_3.pdf).
12. Havašová, M., Bucha, T., Ferencík J., Jakuš, R. (2015). Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Ann. For. Res.*, V. 58, 2, 295–310, DOI: 10.15287/afr.2015.388.
13. Horler, D. N. H., Dockray, M., Barber, J. (1983). The red edge of plant leaf reflectance. *Journal of Remote Sensing*, V. 4, 2, 273–288.
14. Hunt Jr, E. Raymond; Rock, Barrett N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, V. 30, 1. 43–45.
15. Lausch, A., Heurich, M., Gordalla, D., Dobner, H. J., Gwilym-Margianto, S., Salbach, C. (2013). Forecasting potential bark beetle outbreaks based on spruce forest vitality using hyperspectral remote-sensing techniques at different scales. *Forest Ecology and Management*, V. 308, 76–89.
16. Lyalko, V. I., Sakhatsky, A. I., Hodorovsky, A. J., Shportjuk, Z. M., Sibirtseva, O. N., Marek, K.-H., Oppitz S. (1998). Monitoring of chernobyl disaster area using multitemporal satellite data. *International In: Archives of photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXII, Part 7, Budapest, 726–730.
17. Rouse, J. W., Haas, Jr. R.H., Schell, J. A., Deering, D. W. (1978). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC*, 1, 93 p.

## References

1. Multispectral remote sensing in nature management. (2006). Edited by V. I. Lyalko and M. O. Popov. Kiev: Naukova Dumka, 357 p. (Ukrainian).
2. The State Agency for Forestry Affairs introduces measures to combat massive deforestation. (2017). URL: [http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art\\_id=183151&cat\\_id=32888](http://dklg.kmu.gov.ua/forest/control/uk/publish/article?art_id=183151&cat_id=32888) (Ukrainian).
3. Zholobak, G. M. (2010). Domestic experience of satellite monitoring of Ukraine's forests. *Kosmichna nauka i texnologiya*, V. 16, 3, 56–64. (Ukrainian).
4. Law of Ukraine On Environmental Impact Assessment. (2017). *Information on the Verkhovna Rada (VR)*, V. 29, 315. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19>. (Ukrainian).
5. Lyalko, V. I., Sakhatsky, A. I., Hodorovsky, A. J. (2003). Features of monitoring of forest masses on the basis of the use of materials of multizonal space survey (on the example of forests of Ukraine and Central Siberia). *Proc. of Third Ukr. conf. on advanced space research. Katsiveli, Crimea, (Russian)*.
6. Lyalko, V. I., Azimov, A. T., Sakhatsky, A. I., Hodorovsky, A. J. (2001). Estimation of the phytosanitary state of the forests on the Right Bank of the Pripyat River in the exclusion zone on materials of multizone space surveying. *International conference 15 Years of the Chernobyl Disaster: The Experience of Overcoming*. Kiev: V.2. p.137. (Ukrainian).
7. Lyalko, V. I., Popov, M. O., Sakhatsky A. I., Zholobak, G. M.,



## КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ — ЭФФЕКТИВНЫЙ МЕХАНИЗМ ОХРАНЫ ЛЕСОВ

В. І. Лялько, Г. М. Жолобак, А. Я. Ходоровский, А. А. Апостолов, О. Н. Сибирцева, Л. А. Елистратова, И. Ф. Романчук, Е. Н. Дорофей

Проведена классификация горных лесов Карпатского национального природного парка (КНПП) с целью уточнения распределения их породного состава и фитосанитарного состояния. Установлено, что площадь лиственных лесов, относительно хвойных, на этой территории Карпат постоянно увеличивается. Исследованы факторы поражения ельников Карпат и обосновано утверждение, что поврежденные участки леса располагаются преимущественно на пониженных участках рельефа. Проанализировано фитосанитарное состояние отдельных участков лесов на основании данных спутника Sentinel-2 и установлены существенные различия в величинах показателей яркости и значений вегетационных индексов величин показателей NDVI и MSI между пораженными и здоровыми участками.

**Ключевые слова:** лес, вредители, короед, Карпатский национальный природный парк, дистанционные методы исследования Земли, Landsat-8, Sentinel-2

## SPACE MONITORING OF THE ENVIRONMENT — AN EFFECTIVE MECHANISM OF FOREST PROTECTION

V. I. Lyalko, G. M. Zholobak, A. Ya. Hodorovsky, A. A. Apostolov, O. M. Sybirtseva, L. O. Elistratova, I. F. Romanciuc, Ye. M. Dorofey

The supervised classification of mountain forests in Carpathian National Nature Park was carried out in order to clarify the spatial distribution of their species composition and phytosanitary conditions. The area of deciduous forests in territory of the Carpathians is constantly increasing comparing with coniferous forests. The investigation of affection factors for Carpathian spruce forests established that the damaged forest areas are mainly located in relief depressions. On the basis of Sentinel-2 satellite data the phytosanitary condition of individual forest areas was analyzed. The significant differences in brightness values and vegetation indices NDVI and MSI between diseased and healthy areas were determined.

**Keywords:** forest, vermin, beetle, Carpathian National Nature Park, remote sensing of the Earth, Landsat-8, Sentinel-214