

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ СОСНОВОГО ЛІСУ, УРАЖЕНОГО ВЕРХІВКОВИМ КОРОЇДОМ

Т.В. Ільєнко, Д.М. Шерстюк

*Інститут агроекології і природокористування НААН
(м. Київ, Україна)*

e-mail: tilienko@gmail.com; ORCID: 0000-0001-5406-5449

e-mail: volaf666@gmail.com; ORCID: 0009-0001-1687-5974

Висвітлено методичні підходи до виявлення уражених лісових ділянок на прикладі аналізу причин загибелі соснового масиву Острівського лісництва ДП «Вищедубечанський лісгосп» Київської обл. У статті представлено можливість застосування супутникових даних для спостережень за станом лісових масивів. Для виявлення причин загибелі масиву сосни було проведено супутникове та наземне спостереження. Використовуючи супутникові знімки Airbus та Sentinel-2, було проаналізовано динаміку зміни стану сосон упродовж п'яти років (2017–2022 рр.). Визначено зв'язок стану соснових насаджень з їх спектральними характеристиками, зокрема з нормалізованим диференційним вегетаційним індексом NDVI та нормалізованим диференційним індексом вологості NDMI за даними супутника Sentinel-2, які були отримані із сайту сервісу Європейського космічного агентства Sentinel Hub EO Browser. Результати дослідження підтвердили повне ураження соснового масиву внаслідок діяльності жука — верхівкового короїда, а також визначено площу ураження. Виявлено можливі причини спалаху поширення верхівкового короїда в лісових екосистемах Київської обл., зокрема підвищення температури та зниження кількості опадів, що призвело до ослаблення соснових насаджень. Розглянуто методичні підходи до виявлення уражених масивів сосни. Показано, що для автоматичного дешифрування пошкоджених масивів насаджень доцільно комплексне застосування вегетаційних індексів NDVI та NDMI, що дає можливість виявляти уражені ділянки на ранніх стадіях за зміною спектральних характеристик крон дерев та вмісту вологи в рослинності. Наведено результати моніторингу санітарних і відновлювальних заходів для цього масиву соснових насаджень. Використання супутникових даних для моніторингу лісових екосистем є ключовим інструментом для визначення проблемних ділянок на ранніх стадіях, розробки стратегій боротьби зі шкідниками та мінімізації негативних наслідків.

Ключові слова: *голонасінні дерева, вегетаційний індекс, вміст вологи, Sentinel-2, спектральні характеристики, шкідники, санітарні та відновлювальні заходи.*

ВСТУП

Сучасні екосистеми постійно стикаються з різноманітними загрозами, зокрема поширенням шкідників, що спричиняє значні пошкодження лісовим масивам. Верхівковий короїд (*Dendroctonus* spp.) вважається одним з найбільш шкідливих жуків-короїдів, який уражає соснові дерева, що викликає серйозні наслідки для лісових екосистем. Щороку від хвороб і шкідників у світі потерпають близько 35 млн га лісів. Половина з них пошкоджена короїдами. В Україні також спостерігається масове висихання хвойних лісів, пов'язано зі зміною клімату, зокрема глобальним потеплінням.

Підвищення температури повітря та зменшення кількості атмосферних опадів є причиною зниження рівня ґрунтових вод, що сприяє ослабленню дерев, і вони втрачають опір до заселення шкідливими комахами та ураження збудникам хвороб. В цих умовах актуальним є розробка сучасних методів виявлення поширення кризових явищ, зокрема ураження шкідниками лісів, їх моніторингу, та визначення площ пошкоджених масивів.

Моніторинг стану лісових масивів та оцінка поширення верхівкового короїда є надзвичайно важливим завданням для розуміння та контролю негативного впливу цього шкідника на лісові екосистеми. Для

ефективного управління та захисту лісових ресурсів необхідно мати достовірну та об'єктивну інформацію про стан уражених масивів. Останніми роками з'явилися нові можливості для моніторингу лісових екосистем за допомогою супутникових даних, що надають змогу отримати об'єктивну інформацію про зміни в лісовому покриві та ідентифікувати пошкодження, спричинені шкідниками та хворобами [1–7]. Застосування супутникових знімків дає можливість вивчати динаміку зміни стану лісових екосистем на великій території та в різних часових масштабах. Тому, супутникова інформація здобуває дедалі більшу популярність як ефективний інструмент для моніторингу та аналізу змін у лісових покривах.

Мета статті — розробка методичних підходів до виявлення уражених лісових масивів із використанням супутникових даних на прикладі аналізу причин загибелі соснового масиву в Острівському лісництві Вищедубечанського лісового господарства Київської обл., визначення можливості застосування супутникових знімків Airbus і Sentinel-2, вегетаційних індексів NDVI та NDMI для моніторингу стану соснових насаджень, виявлення уражених ділянок на ранніх стадіях, аналізу динаміки їх ураження та оцінки ефективності санітарних і відновлювальних заходів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Останні дослідження в галузі моніторингу лісових екосистем, зокрема використання супутникових даних для виявлення та аналізу уражень верхівковим короїдом, надають важливі висновки та рекомендації, які сприяють розумінню цього проблемного явища. Дистанційне зондування доповнює польові дані та полегшує прогнозування, необхідне для управління лісами, забезпечуючи просторові та часові спостереження характеристик лісу в ландшафтному й регіональному масштабах. Статистичні моделі та моделі машинного навчання, отримані на основі польових спостережень на рівні ділянки, можна екс-

траполовати на більші території за допомогою даних дистанційного зондування. Набори даних мультиспектральних зображень і радарів із синтезованою апертурою (SAR), отриманих із супутникових платформ, можна використовувати для екстраполяції моделей лісових ресурсів на великі регіони [1]. Наступний аналіз деяких останніх досліджень у цій області допомагає з'ясувати поточний стан знань та ідентифікувати важливі аспекти, що впливають на моніторинг та управління верхівковим короїдом у соснових масивах.

Одне з досліджень, проведених Gomez et al. (2020), аналізувало використання супутникових даних для визначення поширення верхівкового короїда в соснових лісах на території ландшафту південно-східного регіону США. Вони оцінили здатність вегетаційних індексних продуктів часових рядів MODIS та Sentinel-2 з'ясувати осередки короїдів на ландшафтах Флориди. В результаті досліджень показано, що MODIS і Sentinel-2 можуть з'ясувати пошкодження, спричинені короїдами в південно-східному регіоні США, але продукти NDVI супутника Sentinel-2 демонструють більший потенціал для виявлення ознак порушень, спричинених короїдами, у південно-східному регіоні США, ніж дані спектродіометра середнього розділення (MODIS), оскільки висока просторово-часова неоднорідність лісових угідь південно-східного регіону перешкоджає їх використанню при поточному розділенні [2].

Інше дослідження, проведено Spruce et al. (2020), фокусувалося на визначенні потенціалу супутникових даних MODIS для оцінки впливу верхівкового короїда на ліси на півночі Скелястих гір Колорадо, США. Здійснений кореляційний аналіз різних продуктів NDVI MODIS із роздільною здатністю 250 м показав, що найвищі значення кореляції з раніше створеною високоточною картою відсотка пошкодження лісів, отриманою з багатоспектрального аерознімання, спостерігалися за використання щоденних продуктів NDVI на основі даних MOD09/MYD09 порівняно з

16-денними продуктами NDVI [3]. Дослідження показало, що застосування супутникових даних MODIS дає можливість оцінювати рівень ураження та розподіл шкідника на великій площі, а точні методи, що використовують такі дані, можуть допомогти визначити пріоритетність заходів з обробки й відновлення лісів.

Також варто відзначити дослідження, проведене König et al. (2023), де застосовувалися мультиспектральні дані з Landsat і Sentinel-2, а також SAR Sentinel-1 та їх комбінації для виявлення зон ураження жуками-короїдами в Баварському лісовому національному парку. Найкращі загальні результати з точки зору просторової точності були досягнуті із Sentinel-2 (макс. загальна точність: 0,93). Результати, отримані із Landsat, були дещо гіршими, ніж із Sentinel-2 (макс. точність: 0,89). Хоча поєднання Landsat і Sentinel-2 давало схожі результати, воно не мало переваг над використанням лише Landsat або Sentinel-2 (макс. точність: 0,87), тоді як Sentinel-1 не зміг виявити уражені ділянки (макс. точність: 0,62). Комбіновані дані з усіх трьох типів супутників також не дали задовільних результатів (макс. точність: 0,67). Результати дослідження переконливо засвідчують, що супутникова система Sentinel-2 найкраще пристосована для картографування осередків інвазій жуків-короїдів. Її ефективність забезпечує висока спектральна чутливість до спричинених короїдами змін спектральних характеристик лісових насаджень. Особливої уваги заслуговують спектральні зони червоного краю, які досі рідко використовувалися для подібних завдань, проте були надзвичайно інформативними в контексті виявлення короїдних вогнищ [4].

Zhang et al. (2022) удосконалили метод сегментації зони ураження лісовими шкідниками шляхом поєднання мультиспектральних, вегетаційних індексів та спектральної інформації Sentinel-2 за допомогою глибокого навчання. Зображення Sentinel-2 були використані для створення набору сигнатур на основі офіційних наземних даних про ураження лісу. Набір

даних містить сигнатури 11 оригінальних спектральних каналів Sentinel-2 та 13 вегетаційних індексів. Отримані результати підтверджують важливість вегетаційних індексів та мультиспектральних даних у покращанні ефективності виявлення ділянок, уражених шкідниками [5].

Abdullah et al. (2019) оцінили здатність спектральних вегетаційних індексів, одержаних за даними супутників Landsat-8 та Sentinel-2, картувати ділянки, уражені короїдом за допомогою аналізу головних компонентів та аналізу методом найменших квадратів. Було відзначено, що більшість спектральних вегетаційних індексів, розрахованих на основі даних Sentinel-2, здатні відрізнити здорові ділянки від уражених. Натомість лише водні індекси (NDWI, DSWI та RDI) були більш ефективними у відокремленні здорових і уражених ділянок. Дослідження показало підвищену чутливість зображень Sentinel-2 до змін, спричинених дією жуків-короїдів, що підкреслює потенціал даних Sentinel-2 для раннього виявлення ураження лісових масивів та створення надійних карт пошкоджених територій [6].

Враховуючи останні дослідження в галузі моніторингу верхівкового короїда за допомогою супутникових даних, можна зробити висновок, що вони надають потужний інструмент для оцінки поширення шкідника та його впливу на лісові екосистеми. Використання вегетаційних індексів таких, як NDVI, EVI та CIrededge, дає змогу автоматично виявляти й картографувати уражені масиви, що допомагає ухвалювати обґрунтовані рішення щодо управління та захисту лісів від верхівкового короїда.

Також варто зазначити, що останні дослідження звернули увагу на взаємозв'язок між поширенням верхівкового короїда та чинниками довкілля. Дослідження вказують на вплив кліматичних умов, особливостей ґрунтового покриву та структури лісових масивів на поширення цього шкідника. Ці знання є важливими для розуміння механізмів поширення верхівкового короїда та розроблення ефективних стратегій контролю й захисту лісових ресурсів.

Загалом, останні дослідження підтверджують значимість використання супутникових даних у моніторингу стану соснових масивів, уражених верхівковим короїдом. Ці дані дають можливість отримати об'єктивну інформацію про поширення шкідника та його вплив на деревостан, що є важливим для розроблення науково обґрунтованих стратегій управління лісовими ресурсами та збереження екологічної рівноваги у лісових екосистемах.

Одним із прикладів моніторингу ушкоджених лісових масивів в Україні може бути праця «Застосування дистанційного зондування для моніторингу стану лісових екосистем Житомирського Полісся, ушкодженого короїдом» (Кучма Т.Л., Ландін В.П., Швиденко І.К., Фещенко В.П., Соломок В.Л., 2019), в якій наочно продемонстрована методика та розписані засоби, завдяки яким було проведено моніторинг лісового масиву [7]. Також деякі наукові дослідження, присвячені вивченню життєдіяльності короїдів та надають уявлення про сучасний рівень розуміння їх генетики [8], визначення динаміки популяцій короїдів та основні тенденції їх розвитку у соснових насадженнях Житомирської обл. та Рівненського Полісся [9; 10]. До того ж

питання ураження дерев верхівковим короїдом досліджувалися в роботах І.Я. Трускавецької (2020). Ці дослідження глибоше розглядають причини й наслідки ураження дерев верхівковим короїдом та надають додатковий контекст для дослідження [11]. Ця інформація важлива для точного визначення періоду активного розповсюдження шкідника та розуміння його поведінки в природному середовищі.

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Дерева, уражені стовбуровими шкідниками, можна розпізнати за певними діагностичними ознаками. В осередках всихання у дерев, нещодавно уражених короїдами, відбувається зміна кольору хвої з зеленого на сіро-зелений та тьмяний, а згодом на рудий із подальшим її опаданням через порушення життєдіяльності. Біля основи стовбурів наявне бурове борошно — результат діяльності шкідників та відламані дрібні гілки із ознаками заселення короїдами на землі під кронами. До того ж відбувається зміна біофізичних характеристик дерев, що призводить до перетворення відбивної здатності їх крон, завдяки чому змінюється їх колір (рис. 1).



Рис. 1. Масив соснових насаджень Острівського лісництва ДП «Вищедубечанський лісгосп»: а — до пошкодження верхівковим короїдом; б — після пошкодження — уражена ділянка окреслена

Примітка: знімки Airbus відповідно за 3.08.2014 та 12.08.2017 (джерело Google Earth Pro).

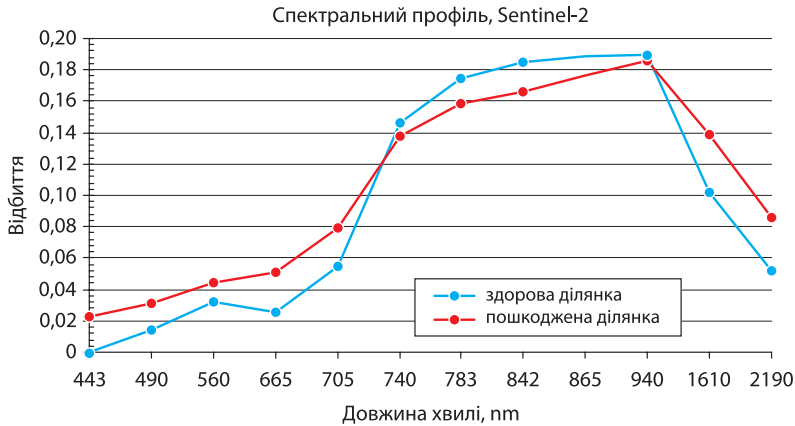


Рис. 2. Спектральний графік відбиття здорової ділянки соснових насаджень та пошкоджених короїдом

Спектральний коефіцієнт яскравості (СКЯ) пікселя супутникового знімка формується складною комбінацією відбитого випромінювання від різних компонентів лісового середовища, включаючи крони дерев, крони нижчих ярусів, підріст, підлісок, живий надґрунтовий покрив, ґрунт та тіні від сусідніх дерев. У здоровій рослинності спостерігається низький рівень відбиття у червоній (0,58–0,75 мкм) зоні спектра та високий рівень відбиття у ближній інфрачервоній (0,72–1,3 мкм) частині спектра (рис. 2). Однак, за пошкодження рослинності та зниження її фотосинтетичної активності, відбиття у червоній зоні збільшується, тоді як у ближній інфрачервоній — зменшується. Крім того, відбуватиметься значне збільшення відбиття у середній інфрачервоній (1,5–5,6 мкм) зоні через зниження вмісту вологи у пошкоджених деревах (див. рис. 2).

Отже, за пошкодження дерев, особливо внаслідок ураження верхівковим короїдом, змінюється відбивна здатність крони сосни, зменшується вплив верхньої крони на СКЯ та збільшується вплив ґрунту, підросту, підліску та надґрунтового покриву [12]. Така зміна спектральних характеристик соснових насаджень дає можливість застосовувати методи дистанційного зондування Землі, зокрема мультиспектральну супутникову зйомку та індексні зображення.

За математичними операціями з кількома спектральними каналами створюються індексні зображення — вегетаційні індекси, що описують стан рослинності. Піксель цього зображення має значення в певному діапазоні. Це дає змогу порівнювати між собою індексні зображення в різні часові періоди або на різні території. Для розрахунку більшості з них використовуються два найстійкіші спектральні діапазони відбивної здатності рослин: червона зона спектра (0,58–0,75 мкм), де спостерігається максимальне поглинання сонячної радіації хлорофілом, та ближня інфрачервона зона (0,72–1,3 мкм) з максимальним відбиттям енергії клітинною структурою листка.

Найбільш оптимальним є використання даних супутникової зйомки з просторовим розрізненням 10–30 м для моніторингу лісових масивів упродовж вегетаційного періоду. До таких даних відносяться знімки супутника Sentinel-2 з просторовим розрізненням 10 м, який здійснює великий обсяг зйомки, що забезпечує багаторазове покриття території дослідження. Для побудови індексних зображень за даними цього супутника використовують зазвичай спектральні канали В4 (червоний), В8 та В11 (табл.).

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI (Normalised Difference

Вегетаційні індекси

Спектри	Канали	Формула	Супутник	Посилання
NDVI	B8 B4	$(B8-B4)/(B8+B4)$	Sentinel-2 L2A	J. Rouse, 1973 p. [13]
NDMI	B8A B11	$(B8A-B11)/(B8A+B11)$	Sentinel-2 L2A	E. Hunt, 1989 p. [14]

Vegetation Index) є простим, але найінформативнішим вегетаційним індексом. Це показник стану здоров'я рослинності, який базується на здатності рослин відбивати хвилі світла певної довжини, червоної та ближньої інфрачервоної зон спектра. Цей індекс дає можливість аналізувати рослинні об'єкти і чітко відокремлювати їх від інших об'єктів. Діапазон значень NDVI становить від -1 до 1 . Від'ємні значення NDVI (значення, що наближаються до -1) означають водні об'єкти. Значення, близькі до нуля (від $-0,1$ до $0,1$), зазвичай вказують на оголені ділянки скель, піску або снігу. Низькі додатні значення характерні для чагарників і лук (приблизно від $0,2$ до $0,4$), або зрідженої рослинності, тоді як високі значення характерні для густої рослинності, зокрема лісів (значення наближені до 1).

Оскільки відбувається усихання соснових насаджень внаслідок пошкодження їх верхівковим короїдом доцільно використовувати спектральний вегетаційний індекс, який пов'язаний із вмістом вологи в рослинності, — нормалізований диференційний індекс вологості NDMI (Normalised Difference Moisture Index). Він обумовлений впливом на відбивну здатність зеленої рослинності смуг водного поглинання, застосовується для визначення вмісту вологи в рослинності та моніторингу посухи. Діапазон значень NDMI становить від -1 до 1 . Від'ємні значення NDMI (значення, що наближаються до -1) відповідають відкритому ґрунту. Значення близькі до нуля (від $-0,2$ до $0,4$) зазвичай позначають водний стрес. Високі додатні значення відповідають високому рослинному покриву, що не зазнає водного стресу (приблизно від $0,4$ до 1). Він дає змогу виявити варіації рослинного покриву, пов'язані з умовами

зволоження, і визначати весь об'єм вологи у вегетаційному рослинному покриві.

Тому, методика досліджень полягала у використанні супутникових даних для встановлення просторового розповсюдження пошкодження території соснових насаджень верхівковим короїдом, зокрема комплексуванням індексів NDVI та NDMI, аналізом їх динаміки впродовж 2017–2020 рр. Дослідження проводились за даними супутника Sentinel-2, які були отримані із сайту сервісу Європейського космічного агентства Sentinel Hub EO Browser (URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>), який надає доступ до супутникових знімків Sentinel-2 з 2014 р.

Територією досліджень обрано масив соснових насаджень Острівського лісництва ДП «Вищедубечанський лісгосп» (рис. 3), який був пошкоджений верхівковим короїдом.

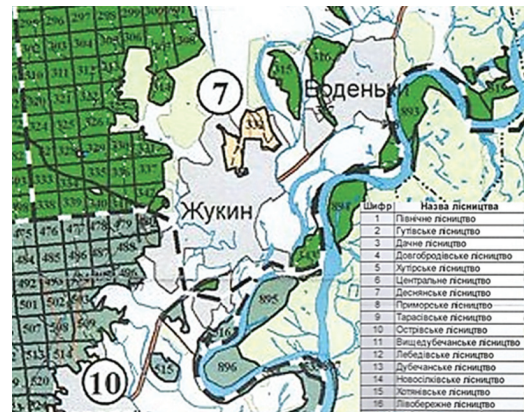


Рис. 3. Територія досліджень — Острівське лісництво ДП «Вищедубечанський лісгосп»

Примітка: розроблено авторами на основі сайту: URL: <https://kyivlis.gov.ua/zp-ssl-dp-vyshhedubechanskyj-lisgosp>.

Як наземні дані було використано інформацію Київського обласного та по м. Києву управління лісового й мисливського господарства щодо заходів із поліпшення стану лісу [14] та безпосередні наземні спостереження. Відомості про санітарний стан соснового масиву міститься у документі «Перелік заходів з поліпшення санітарного стану лісів ДП «Вищедубечанський лісгосп» Київської обл. на 2017 р. від 22.08.2017 р.» [15].

РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Проблема поширення короїдів у хвойних лісах має масштабний характер. Потепління клімату, екстремально високі температури, збільшення кількості посух привели до зростання кількості спалахів короїдів. Зважаючи на необхідність координації міжнародних дій у межах діяльності пан'європейської програми FoRISK (Forest Risk Knowledge Facility) була організована об'єднана робоча група «Управління біотичними загрозами і лісах – уроки спалахів короїдів» (Managing Biotic Threats in Forests – Lessons Learned from Bark Beetle Calamities), яка складалась із понад 40 представників 16 європейських країн,

зокрема України. Робоча нарада цієї групи відбулась 30 травня – 1 червня 2023 р., в якій обговорювались питання стратегії управління ризиками поширення пошкоджень лісових насаджень та заходи управління спалахами короїдів [16].

Зумовлене потеплінням істотне розширення періоду, сприятливого для інтенсивної життєдіяльності ксилофагів (до 7–8 міс.), та наявність великої кормової бази у вигляді ослаблених деревостанів закономірно стимулює подальше значне наростання їх чисельності. Так, верхівковий короїд утворює за вегетаційний період уже не два повноцінні покоління, а три [17].

Внаслідок зміни клімату, підвищення температури, сосни стають більш вразливими до нападу короїда верхівкового. Починаючи з 2013 р. у Київській обл. спостерігалось підвищення середньої температури наземного покриву за вегетаційний період, її перевищення середньобіаторічної температури вегетаційного періоду, яка становить 17,7°C (рис. 4). Також було відмічено зниження середньомісячної суми опадів порівняно із середньобіаторічними даними (рис. 5).

Отже тривалий посушливий період підвищена температура сприяли ослабленню

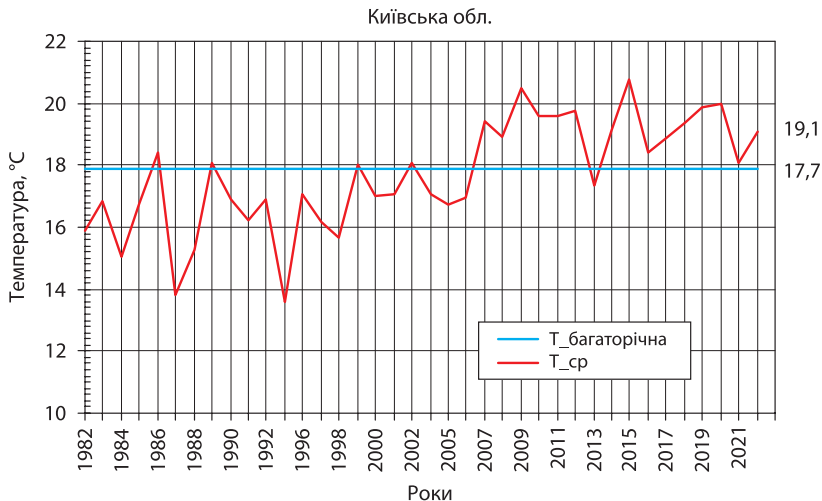


Рис. 4. Середня температура наземного покриву за вегетаційний період

Примітка: побудовано авторами за даними STAR NESDIS NOAA – Satellite Applications and Research of NOAA's National Environmental Satellite Data Information Services [18].

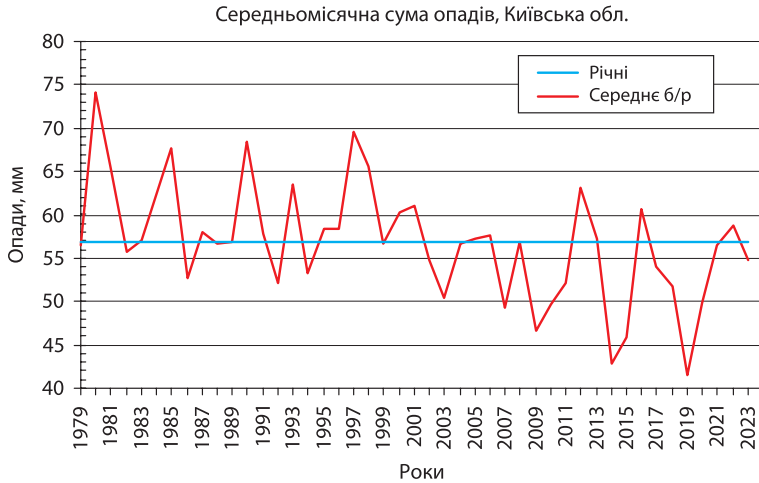


Рис. 5. Середньомісячна сума опадів

Примітка: побудовано авторами за даними ERA5 ECMWF / Copernicus Climate Change Service [19].

соснових насаджень, що стало поштовхом до збільшення чисельності короїда в Київській обл.

Для відстеження поширення ураження соснового масиву верхівковим короїдом було використано знімки в режимі True Color.

На *рис. 1* показано досліджувану ділянку соснового масиву, яка становить площу в 0,01 км², в True Color за даними супутника Airbus (джерело Google Earth Pro) до ураження короїдом та на момент, коли сосновий масив був повністю уражений (знімок 2017 р., *рис. 1, б*), що добре видно по засохлих деревах в масиві.

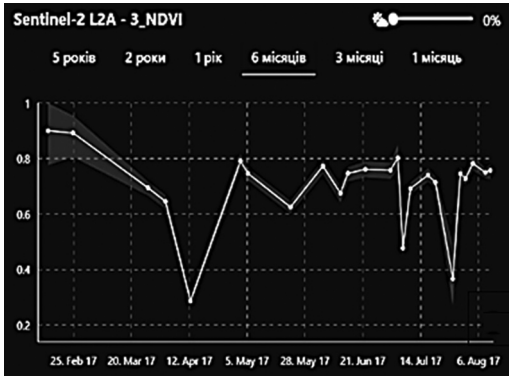
Нами було побудовано завдяки сервісу Sentinel EO Browser графіки індексів NDVI і NDMI для ураженої верхівковим короїдом ділянки соснових насаджень і для еталонної ділянки здорових соснових насаджень. Згідно аналізу графіків цих індексів, можна зробити такі висновки: для ділянки здорових соснових насаджень у середньому значення NDVI становлять 0,6–0,8 (*рис. 6, а*), в той час як для ураженої ділянки значення цього індексу починають знижуватись у квітні 2017 р. від 0,6 до 0,4 і нижче у липні 2017 р. (*рис. 6, б*), що є індикатором погіршення стану соснового масиву. Для еталонної ділянки значення індексу

вологості NDMI знаходяться в діапазоні 0,2–0,4 (*рис. 7, а*), крім того, для ураженої ділянки значення індексу вологості NDMI нижче 0,2 (*рис. 7, б*), що є індикатором усихання соснових насаджень. Піки в графіках це є похибка програми, пов'язана з урахуванням деяких знімків поганої якості. Тому вищенаведені індекси NDVI і NDMI можуть бути індикаторами ураження соснового масиву верхівковим короїдом.

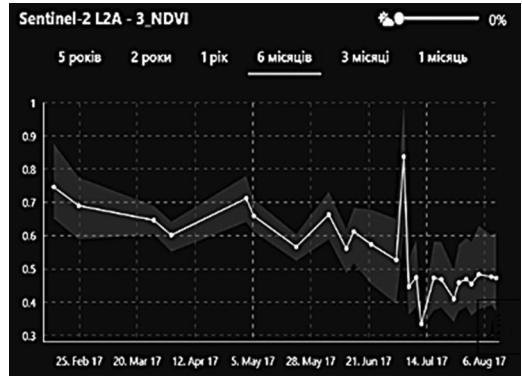
Для одночасного врахування погіршення стану соснових насаджень і їх усихання було виконано операцію синтезу растрів індексів NDVI та NDMI в програмному забезпеченні QGIS для аналізу динаміки поширення короїда (*рис. 8*).

Відомо, що верхівковий короїд досить сильно залежить від температурних показників, які регулюють його процеси життєдіяльності. Згідно з даними ДСЛП «Київлісозахист» можна стверджувати, що для активної діяльності верхівкового короїда температура повітря 20°C є комфортною, за якої починається їх масовий літ і заселення дерев на прилеглих територіях [20].

Як видно, за даними метеостанцій ця температура була вже досягнута на червень 2017 р. і трималась упродовж липня (*рис. 9*). Отже, активне поширення верхів-

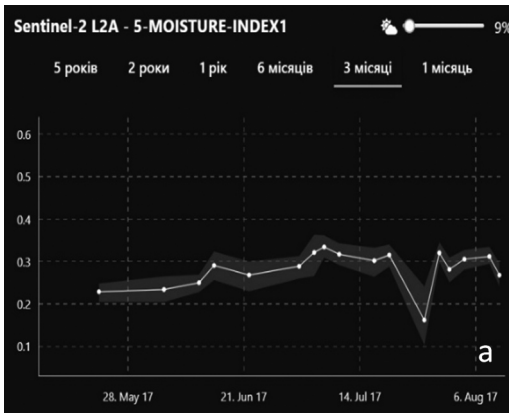


a

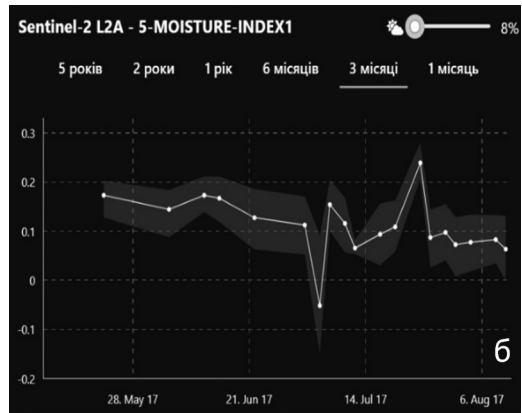


б

Рис. 6. Графік NDVI для ділянки здорових соснових насаджень (*a*) та ураженої верхівковим короїдом (*б*)



a



б

Рис. 7. Графік NDMI для ділянки здорових соснових насаджень (*a*) та ураженої верхівковим короїдом (*б*)



Рис. 8. Динаміка пошкодження соснового масиву

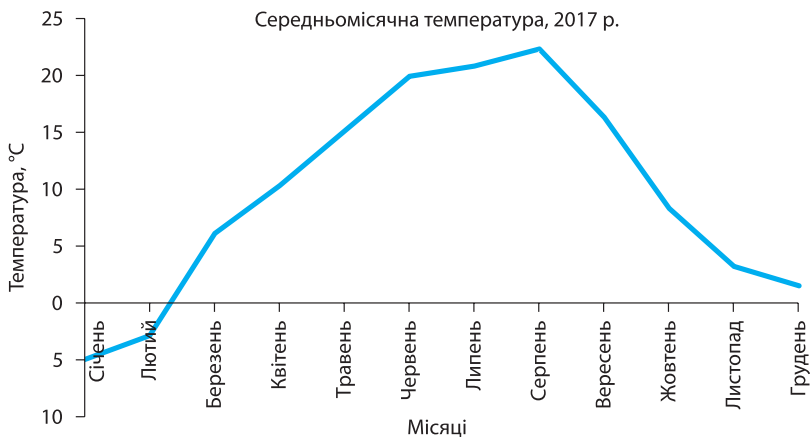


Рис. 9. Середньомісячна температура по метеостанції м. Київ за 2017 р.

Примітка: розроблено авторами на основі [21].

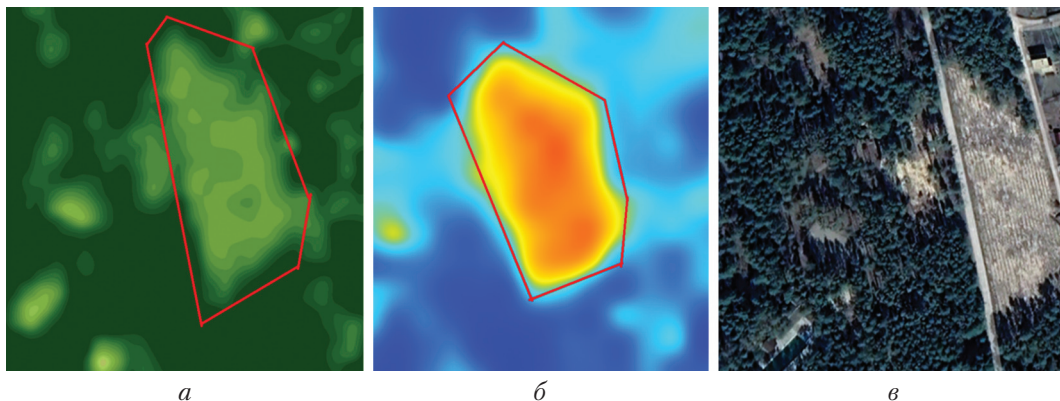


Рис. 10. Результат санітарної вирубки масиву пошкоджених насаджень:
a – NDVI; *б* – NDMI (спутниковий знімок Sentinel-2, 31.08.2018, Sentinel EO Browser);
в – 13.04.2020 Airbus (джерело Google Earth Pro)

кового короїда припало на липень як за нашими даними (дис. рис. 8), так і середньою температурою за 2017 р.

У результаті у 2018 р. була проведена санітарна вирубка пошкодженого соснового масиву площею 0,01 км², що простежується за індексами NDVI, NDMI та знімком у режимі TrueColor (рис. 10) та графіком NDVI за період з 11.08.2018 по 7.11.2018, де спостерігається зниження його значень у серпні 2018 р. від 0,6 до 0,25 (рис. 11).

У 2019 р. було започатковано проєкт із відновлення лісової екосистеми шляхом створення нової лісової плантації сосни.

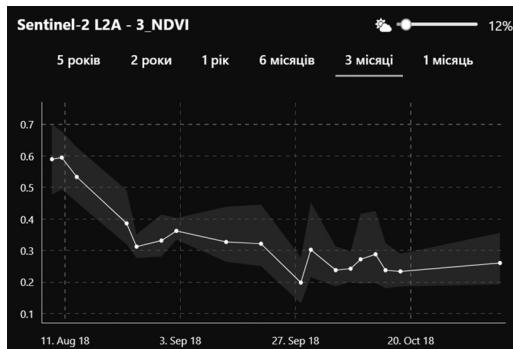


Рис. 11. Динаміка NDVI для території дослідження (Sentinel EO Browser)

Спостереження за супутниковими знімками у квітні 2024 р. демонструють успішний ріст молодого соснового лісу. Аналіз індексу NDVI, який використовується для оцінки стану рослинного покриву, засвідчує позитивну динаміку. Наприкінці квітня 2020 р. значення індексу становило 0,25, що вказувало на переважання відкритого ґрунту. Однак у квітні 2024 р. цей показник збільшився до 0,45, що свідчить про активне зростання рослинності та успішне відновлення лісової екосистеми. Ця інформація підтверджується наземними дослідженнями: висота висаджених сосон сягає 80–100 см, площа засадженої ділянки 0,01 км².

ВИСНОВКИ

Отже, результати дослідження продемонстрували ефективність використання супутникових даних, зокрема знімків Sentinel-2 та індексів NDVI і NDMI, для моніторингу поширення верхівкового ко-

роїда у соснових лісах. Комплексне застосування цих індексів дає змогу виявляти уражені ділянки на ранніх стадіях за зміною спектральних характеристик крон дерев та вмісту вологи в рослинності. Аналіз супутникових даних підтвердив повне ураження верхівковим короїдом соснового масиву площею 0,01 км² у Острівському лісництві ДП «Вищедубечанський лісгосп» Київської обл. у 2017 р. Виявлено зв'язок між активізацією поширення короїда та кліматичними змінами, зокрема підвищенням температури та зниженням кількості опадів, що призвело до ослаблення соснових насаджень.

Отримані результати демонструють важливість використання супутникових даних для своєчасного виявлення осередків поширення шкідників лісових екосистем, визначення площ ураження, контролю ефективності санітарних заходів та моніторингу відновлення лісових масивів після їх проведення.

ЛІТЕРАТУРА

- Massey R., Berner L.T., Foster A.C., Goetz S.J. and Vepakomma U. Remote Sensing Tools for Monitoring Forests and Tracking Their Dynamics. Boreal Forests in the Face of Climate Change. *Advances in Global Change Research*. 2023. Vol. 74. P. 637–656. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_26.
- Gomez D., Ritger H., Pearce C., Eickwort J. and Hulcr J. Ability of Remote Sensing Systems to Detect Bark Beetle Spots in the Southeastern US. *Forests*. 2020. Vol. 11 (11). P. 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11111167>.
- Spruce J.P., Hicke J.A., Hargrove W., Grulke N.E. and Meddens A.J.H. Use of MODIS NDVI Products to Map Tree Mortality Levels in Forests Affected by Mountain Pine Beetle Outbreaks. *Forests*. 2019. Vol. 10 (9). P. 811. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090811>.
- König S., Thonfeld F., Förster M., Dubovyk O. and Heurich M. Assessing Combinations of Landsat, Sentinel-2 and Sentinel-1 Time series for Detecting Bark Beetle Infestations. *GIScience & Remote Sensing*. 2023. Vol. 60 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2226515>.
- Zhang J., Cong S., Zhang G. et al. Detecting Pest-Infested Forest Damage through Multispectral Satellite Imagery and Improved UNet++. *Sensors*. 2022. Vol. 22 (19). P. 7440. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197440>.
- Abdullah H., Skidmore A.K., Darvishzadeh R. and Heurich M. Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 2019. Vol. 5. P. 87–106. DOI: <https://doi.org/10.1002/rse2.93>.
- Кучма Т.Л., Ландін В.П., Швиденко І.К. та ін. Застосування дистанційного зондування для моніторингу стану лісових екосистем Житомирського Полісся, ушкоджених короїдами. *Економічна безпека та збалансоване природокористування в агропромисловому виробництві*: матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф. (м. Київ, 3–5 липн. 2019 р.). Київ: ДІА, 2019. С. 152–156.
- Janes J.K. and Batista P.D. The Role of Population Genetic Structure in Understanding and Managing Pine Beetles. *Advances in Insect Physiology / Tittiger C., Blomquist G.J. (Eds.)*. Academic Press. 2016. Vol. 50. P. 75–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.aaip.2016.01.001>.
- Андреева О.Ю., Вишневський А.В., Болюх С.В. Динаміка популяції короїдів у соснових лісах Житомирської області. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Вип. 29 (8). С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.36930/40290803>.
- Andrieva O.Y., Guzii A.I., Vyshnevskiy A.V. et al. Поширення осередків масового розмноження короїдів у соснових насадженнях Рівненського Полісся. *Науковий вісник НЛТУ*. 2018. Вип. 28 (3). С. 14–17. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280302>.
- Трускавецька І.Я. Особливості біології та шкідливості жуків родини короїди (*Ipidae*) у лісових

- екосистемах Бучацького лісництва Черкаської області. *Екологічні науки*. 2020. Вип. 2 (1). С. 91–95. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.есо.2-29.1.14>.
12. Ландін В.П., Кучма Т.Л., Швиденко І.К. та ін. Методичні рекомендації з виявлення поширення осередків усихання лісових насаджень внаслідок ураження верхівковим короїдом за допомогою методів дистанційного зондування. К., 2019. 16 с.
 13. Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A. and Deering D.W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA*. 1973. SP-351. Vol. 1. P. 309–317. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>.
 14. Hunt E.R. and Rock B.N. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*. 1989. Vol. 30 (1). P. 43–54. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1).
 15. Перелік заходів з поліпшення санітарного стану лісів ДП «Вищедубечанський лісгосп» Київської області на 2017 рік від 22.08.2017 р. URL: https://kyivlis.gov.ua/wp-content/uploads/2017/10/pzps_2017_dp_vischedubechanskiy_l_сgosp.pdf.
 16. Мешкова В., Давиденко К. Як «погасити» спалахи короїдів. Міжнародний досвід. *Природа і суспільство*. 2023. № 3–32 (435–436). С. 3–5.
 17. Бородавка В., Гетьманчук А., Бортник Т., Кичиліюк О., Войтюк В. Новий патогенний комплекс соснових лісів Волинського Полісся. *Науковий вісник Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки*. 2017. С. 23–31. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/13232/1/7.pdf>.
 18. STAR — Global Vegetation Health Products: Province-Averaged VH. URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_adminMean.php?type=Province_Weekly_MeanPlot/.
 19. ERA5 Monthly Aggregates — Latest Climate Re-analysis Produced by ECMWF / Copernicus Climate Change Service. URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_MONTHLY#description.
 20. Верхівковий короїд. URL: <https://kyivlisvozahyst.com.ua/novini/novina/verkhivkovii-korojid>.
 21. МЕТЕОПОСТ. Статистика погоди. Кліматичні дані за роками та місяцями. URL: <https://meteopost.com/weather/climate/>.

REFERENCES

1. Massey, R., Berner, L.T., Foster, A.C., Goetz, S.J. & Vepakomma, U. (2023). Remote Sensing Tools for Monitoring Forests and Tracking Their Dynamics. *Boreal Forests in the Face of Climate Change. Advances in Global Change Research*, 74, 637–656. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-15988-6_26 [in English].
2. Gomez, D., Ritger, H., Pearce, C., Eickwort, J. & Hulcr, J. (2020). Ability of Remote Sensing Systems to Detect Bark Beetle Spots in the Southeastern US. *Forests*, 11 (11), 1167. DOI: <https://doi.org/10.3390/f11111167> [in English].
3. Spruce, J.P., Hicke, J.A., Hargrove, W., Grulke, N.E. & Meddens, A.J.H. (2019). Use of MODIS NDVI Products to Map Tree Mortality Levels in Forests Affected by Mountain Pine Beetle Outbreaks. *Forests*, 10 (9), 811. DOI: <https://doi.org/10.3390/f10090811> [in English].
4. König, S., Thonfeld, F., Förster, M., Dubovyk, O. & Heurich, M. (2023). Assessing Combinations of Landsat, Sentinel-2 and Sentinel-1 Time series for Detecting Bark Beetle Infestations. *GIScience & Remote Sensing*, 60 (1). DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2226515> [in English].
5. Zhang, J., Cong, S., Zhang, G. et al. (2022). Detecting Pest-Infested Forest Damage through Multispectral Satellite Imagery and Improved UNet++. *Sensors*, 22 (19), 7440. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197440> [in English].
6. Abdullah, H., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R. & Heurich, M. (2019). Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus* L.) compared with Landsat-8. *Remote Sens. Ecol. Conserv.*, 5, 87–106. DOI: <https://doi.org/10.1002/rse2.93> [in English].
7. Kuchma, T.L., Landin, V.P., Shvidenko, I.K. et al. (2019). Zastosuvannya dystantsiynoho zonduvannya dlya monitoringhu stanu lisovykh ekosystem Zhytomyrs'koho Polissya, ushkodzhennykh koroyidamy [Application of remote sensing to monitor the state of forest ecosystems of Zhytomyr Polissia damaged by bark beetles]. *Ekonomichna bezpeka ta zbalansovane pryrodokorystuvannya v ahropromyslovomu vyrobnyts'tvi: materialy Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi [Economic security and balanced use of nature in agro-industrial production: materials of the International Scientific and Practical Conference]*. (pp. 152–156). Kyiv [in Ukrainian].
8. Janes, J.K., Batista, P.D., Tittiger, C. & Blomquist, G.J. (Eds.). (2016). The Role of Population Genetic Structure in Understanding and Managing Pine Beetles. *Advances in Insect Physiology*, 50, 75–100. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.aiip.2016.01.001> [in English].
9. Andreyeva, O.Yu., Vishnevskiy, A.V. & Bolyukh, S.V. (2019). Dynamika populyatsiy koroyidiv u sosnovykh lisakh Zhytomyrs'koyi oblasti [Dynamics of bark beetle populations in pine forests of Zhytomyr region]. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy — Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 29 (8), 31–35. DOI: <https://doi.org/10.36930/40290803> [in Ukrainian].
10. Andreieva, O.Y., Guzii, A.I., Vyshnevskiy, A.V. et al. (2018). Poshyrennya osередkiv masovoho rozmnozhennya koroyidiv u sosnovykh nasadzhenyakh Rivnens'koho Polissya [Spread of bark beetles foci in pine stands of Rivne Polissya]. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy — Scientific bulletin of NLTU of Ukraine*, 28 (3), 14–17. DOI: <https://doi.org/10.15421/40280302> [in Ukrainian].
11. Truskavetska, I.Ya. (2020). Osoblyvosti biolohiyi ta shkidlyvist' zhukiv rodyny koroyidy (*Ipidae*) u lisovykh

- ekosystemakh Buchats'koho lisnytstva Cherkas'koyi oblasti [Peculiarities of biology and harmfulness of beetles of the bark beetle family (*Ipidae*) in forest ecosystems of the Buchatsky forestry of the Cherkasy region]. *Ekolohichni nauky — Ecological Sciences*, 2 (1), 91–95. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolnauk_2020_2\(1\)_16](http://nbuv.gov.ua/UJRN/ekolnauk_2020_2(1)_16) [in Ukrainian].
12. Landin, V.P., Kuchma, T.L., Shvidenko, I.K. et al. (2019). *Metodychni rekomendatsiyi z vyvavlenyia poshyrennia oseredkiv usykhannya lisovykh nasadzen' v' naslidok urazhennya verkhivkovym koroyidom za dopomohoyu metodiv dystantsiynoho zonduvannya [Methodological recommendations for detecting the distribution of foci of withering of forest stands as a result of damage by apical bark beetle using remote sensing methods]*. Kyiv [in Ukrainian].
 13. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. *Third ERTS Symposium, NASA SP-351, 1*, 309–317. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf> [in English].
 14. Hunt, E.R. & Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of the environment*, 30 (1), 43–54. DOI: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(89\)90046-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(89)90046-1) [in English].
 15. Perelik zakhodiv z polipshennya sanitarnoho stanu lisiv DP «Vishchedubechans'kyi lis-hosp» Kyiviv'koyi oblasti na 2017 rik vid 22.08.2017 [List of measures to improve the sanitary condition of forests of the SE «Vishchedubechanskiy forest farm» of the Kyiv region for 2017 from 08.22.2017]. (n.d.). URL: https://kyivlis.gov.ua/wp-content/uploads/2017/10/pzps_2017_dp_vishchedubechanskiy_l_sgosp_.pdf [in Ukrainian].
 16. Meshkova, V. & Davydenko, K. (2023). Yak «pohasyty» spalakhny koroyidiv. Mizhnarodnyy dosvid [How to «extinguish» outbreaks of bark beetles. International experience]. *Pryroda i suspil'stvo — Nature and society*, 31-32 (435–436), 3–5 [in Ukrainian].
 17. Borodavka, V., Hetmanchuk, A., Bortnik, T., Kychlyuk, O. & Voytiuk, V. (2017) Novyy patohennyi kompleks sosnovykh lisiv Volyns'koho Polissya [New pathogenic complex of pine forests of Volyn Polissia]. *Naukovyy visnyk Skhidnoyevropeys'koho natsional'noho universytetu imeni Lesi Ukrayinky — Scientific bulletin of Lesya Ukrainka East European National University*, 7, 23–31. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/13232/1/7.pdf> [in Ukrainian].
 18. STAR — Global Vegetation Health Products: Province-Averaged VH. (n.d.). URL: https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/emb/vci/VH/vh_adminMean.php?type=Province_Weekly_MeanPlot/ [in English].
 19. ERA5 Monthly Aggregates — Latest Climate Reanalysis Produced by ECMWF / Copernicus Climate Change Service. (n.d.). URL: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/ECMWF_ERA5_MONTHLY#description [in English].
 20. Verkhivkovyy koroyid [Apical bark beetle]. (n.d.). URL: <https://kyivlisozahyst.com.ua/novini/novina/verkhivkovii-koroyid> [in Ukrainian].
 21. METEOPOST. Statystyka pohody. Klimatychni dani za rokamy ta misyatsyamy [METEOPOST. Weather statistics. Climatic data by year and month]. (n.d.). URL: <https://meteopost.com/weather/climate/> [in Ukrainian].

Стаття надійшла до редакції журналу 02.05.2024