

Information systems modeling

УДК 004.89

doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2022.1.03>

О. В. Барабаш, О. І. Бандурка

Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА ОСНОВІ ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ БАЙЄСА ТА ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Анотація. Сьогодні різноманітну інформацію про лісові екосистеми можна отримати за допомогою методів дистанційного зондування Землі. Використання космічних даних моніторингу лісів є економічно вигідним, тому що дозволяє швидко отримувати об'єктивну інформацію, необхідну лісівникам для вирішення практичних задач. Супутникові дані забезпечують широке охоплення лісових угідь, високу точність результатів, а також високу частоту отриманих даних. Для дослідження було обрано космічні знімки території Овруцького району Житомирської області України влітку 2020 року. Визначення породного складу проведено методами керованої класифікації, а саме класифікатором Байєса. Встановлено, що 70 % лісів є сосновими, у меншій кількості зустрічаються осикові, грабові, березові, вільхові та ясеневі породи дерев. За статистичними даними впродовж 2000-2020 рр. в Україні було пошкоджено і знищено лісовими пожежами 51,4 тис. га лісових насаджень. Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж необхідна для вирішення широкого класу прикладних завдань лісового господарства. Важливим завданням при оцінці еколого-економічного збитку, нанесеного лісовому господарству внаслідок лісових пожеж, є визначення площі пошкоджених лісів. У роботі розглядається технологія визначення території лісу, де пройшла пожежа, з використанням космічних знімків супутника Landsat 8. Для виявлення спалених пожежею територій та рівнів враження використовується нормалізований індекс згарища NBR до та після пожежі й індекс DNBR. Для прогнозування лісових пожеж створена математична модель на основі теореми Байєса та створена тематична карта з класами пожежної небезпеки поквартально. Для перевірки точності результатів створеної прогнозовної моделі проведено суміщення тематичної карти з шаром визначених територій згарищ. Даний програмний продукт є досить гнучким та універсальним, він може бути легко адаптованим для застосування не тільки для визначення спалених лісових угідь, а й для інших територій.

Ключові слова: моделювання лісових пожеж; інформаційна система; космічні знімки; дистанційне зондування Землі; Quantum GIS; індекс згарищ; формула Байєса; ймовірність виникнення пожежі.

Вступ

Ліси є головним наземним компонентом підтримки природної рівноваги в біосфері, джерелом відновлювальних біотичних ресурсів в період глобальних змін клімату. Об'єктивні дані про лісові ресурси, динаміка створення насаджень та лісокористування, їх біорізноманітність та географія є досить складним комплексним завданням для створення наукового та технічного забезпечення обліку та впорядкування лісів. На виконання цього завдання впливає також негативний антропогенний фактор, який іноді призводить до незворотних наслідків. У 80-х роках минулого століття та в 2000-х роках в Україні були зафіксовані масштабні лісові пожежі.

Проте в 2020 році великі пожежі пройшлися лісами Київської та Житомирської областей та призвели до знищення великої площі лісових угідь. Сучасний рівень аналітичних методів та комп'ютерних програм дозволяє суттєво підвищити моніторинг лісових угідь та спрогнозувати пожежну небезпеку в лісах.

Прогнозування лісових пожеж – це визначення ймовірності їх виникнення та розповсюдження в часі й просторі, ґрунтуючись на аналізі даних моніторингу лісів. Для прогнозування необхідні такі дані:

- клас пожежної небезпеки за погодними умовами;
- місцеположення та площі ділянок лісового фонду I-III класів пожежної небезпеки;

- орографічні дані (тип рельєфу: рівнини, пагорбки, гори, плоскогір'я, байраки);
- наявність потенційних джерел виникнення вогню на досліджуваній лісовій ділянці;
- дані ретроспективного аналізу розповсюдження пожеж в часі (кількість пожеж по роках, місяцях, тижнях) та за територією (лісництво, квартал, виділ).

Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж, отримана на основі інтеграції прогнозовної моделі та технологій геоінформаційних систем (ГІС), є вкрай необхідною для вирішення різноманітних завдань в лісовідновленні, актуалізації даних про лісові насадження, охороні природного лісового фонду.

Сьогодні різноманітну інформацію про лісові екосистеми можна отримати за допомогою методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Використання космічних даних моніторингу лісів є економічно вигідним, тому що дозволяє швидко отримувати об'єктивну інформацію, необхідну лісівникам для вирішення практичних задач. Супутникові дані забезпечують широке охоплення лісових угідь, високу точність результатів, а також високу частоту отриманих даних [1-9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз сучасних наукових та інформаційних джерел в області досліджень пожежонебезпечних територій та створення прогнозних моделей виникнення лісових пожеж виявив цілу низку фундаментальних та перспективних робіт.

У дослідженнях Васильєва А.В., Краснящих А.В., Коротасєва В.В. розглянута розробка програмно-апаратного комплексу виявлення та моніторингу лісових пожеж на базі безпілотного літального апарату. У роботі [10] застосовується метод суміщення зображень тепловізійного та телевізійного каналів, детально описана архітектура спеціального програмного забезпечення. Худов В., Кучук Г., Маковейчук М., Крижний А. зосереджують свій аналіз на відомих методах сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження [8].

За принципом побудови є аналітичні, імітаційні та статистичні математичні моделі. Аналітичні моделі лісових пожеж описані в роботах Гришина А.М., Куценка Л.М., Васильєва С.В. [12, 13], у яких створена математична і фізична модель, наведена основна модель рівнянь, розглянута структура фронту пожежі і граничні умови його розповсюдження. Проте чисельні розв'язання систем рівнянь не володіють достатньою простотою, в умовах невизначеностей методи вимагають велику кількість фізичних характеристик та складних математичних розрахунків, тому вони непридатні для проведення оперативно-тактичних заходів.

Для розробки довгострокового прогнозу змін пожежонебезпеки для змішаних типів лісів у світі вже використовують розроблений комплекс програм FORRUS-S, який призначений для імітаційного моделювання та аналізу динамічних процесів, що відбуваються у лісах. Вихідною інформацією для побудови моделі є виділи таксацій та планів лісових насаджень. Програмно-технічне рішення є прототипом програмного модуля, що дозволяє функціонально інтегрувати чотири математичних модуля різних компонентів системи та процесів кругообігу елементів в одну систему [17, 18].

Актуальність даної роботи полягає у відсутності універсальної системи, в якій би прослідковувалася інтеграція математичної моделі, ГІС технологій та прогнозу моделі експерта, яка була б гнучко пристосована до всіх типів лісових насаджень та значним чином розширила б можливості прийняття правильних управлінських рішень.

Метою дослідження є розробка інформаційної системи, яка буде аналізувати наслідки лісових пожеж із використанням технологій ДЗЗ та робити прогнози

щодо виявлення пожежонебезпечних територій на основі прогностичної моделі Байєса.

Основна частина

Для максимізації ефективності управління, зменшення витрат та об'єктивного визначення таксаційних показників в лісовому господарстві доцільним є впровадження методів дистанційного зондування Землі. Вони знаходять широке застосування для моніторингу лісів завдяки доступності супутникових знімків на значних територіях, а отримані дані володіють значною інформативністю й при правильній обробці можуть дати безліч корисної інформації про лісові угіддя: визначення площі, деревного складу, зміни у лісових насадженнях, місця поширення лісових пожеж, вирубок. При аналізі спектральних каналів супутникових знімків є можливість отримати інформацію про «здоров'я» лісу, його ураженість шкідниками чи вік. Загалом можна дізнатися інформацію про майже всі таксаційні показники лісових угідь за допомогою всього лише набору знімків та спеціалізованої програми. Дані дистанційного вимірювання можуть бути використані як альтернатива більш вартісним наземним спостереженням та вимірюванням. Для визначення стану лісових угідь можна використовувати як космічні знімки, так і результати авіаційного знімання. Для детального аналізу лісових угідь найкраще користуватися космічними знімками дуже високої роздільної (субметрової) здатності (GeoEau, QuickBird, WorldView). Проте, з точки зору економічності та достатності для оцінки стану пожежонебезпечності, оптимальним є використання знімків високої (метрової) роздільної здатності.

Для проведення дослідження була обрана територія Овруцького району Житомирської області. Використовуються дані космічних знімків літнього періоду 2020 року, що були зроблені супутником Landsat 8. Знімки знаходяться у вільному доступі і їх можна отримати за допомогою таких сайтів як EOS LandViewer чи USGS Earth Explorer. Знімки мають формат зображення GeoTIFF з географічною системою координат WGS 84 та опорною системою WRS-2. Вони містять одинадцять спектральних каналів, що являють собою різні набори даних, які використовуються для різних цілей (табл. 1).

Таблиця 1 – Спектральні канали знімка Landsat 8

№ п/п	Назва	Довжина хвилі (нм)	Роздільна здатність (м/пікс.)	Що краще показує
1	Coastal Aerosol	0.433 – 0.453	30	Мілководдя, тонкі частинки пилу
2	Синій	0.450 – 0.515	30	Глибоководдя, атмосфера
3	Зелений	0.525 – 0.600	30	Рослинність
4	Червоний	0.630 – 0.680	30	Антропогенні об'єкти, ґрунт, рослинність
5	Ближній інфрачервоний	0.845 – 0.885	30	Берегові лінії, рослинність
6	КХВ* інфрачервоний 1	1.560 – 1.660	30	Хмарність, вологість ґрунтів і рослинності
7	КХВ* інфрачервоний 2	2.100 – 2.300	30	Хмарність, вологість ґрунтів і рослинності
8	Панхроматичний	0.500 – 0.680	15	Чорно-білі знімки, чіткі деталі
9	Перисті хмари	1.360 – 1.390	30	Перисті хмари
10	Тепловий інфрачервоний 1	10.30 – 11.30	100	Термальне картографування, оціночна вологість ґрунтів
11	Тепловий інфрачервоний 2	11.50 – 12.50	100	Покращене термальне картографування, оціночна вологість ґрунтів

* КХВ – короткохвильовий

Актуалізація стану лісових угідь виконана методами керованої класифікації, яка полягає у:

- визначенні класів лісових угідь;
- виконанні класифікації космічного знімка, який являє собою комбінацію спектральних каналів 3, 4, 5, 6, 7, 8;
- побудові векторного картографічного шару лісових масивів на основі растрового шару результатної класифікації.

Визначення класів полягає в формуванні статистичних вибірок пікселів знімку для кожної породи. Вибір виконується шляхом позначення контрольних полігонів на знімку, там де ми точно знаємо породу дерев. Такий вибір ми робимо за допомогою карти лісових виділів. На базі цих статистичних вибірок формуються сигнатури класів. Керована класифікація використовує класифікатор Байєса: на основі сигнатур визначених класів формуються система рівнянь, які визначають ймовірність приналежності пікселя космічного знімка відповідному класу, і для кожного пікселя космічного знімку оцінюється ймовірність його приналежності певному класу (рис. 1).

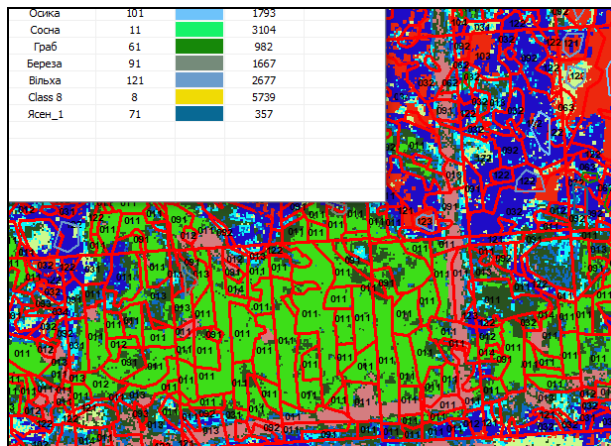


Рис. 1. Класифікація породного складу по лісових виділах Овруцького району

Fig. 1. Classification of species composition by forest species of Ovruch district

Встановлено, що 70 % лісів є сосновими. Також в лісах зустрічаються осикові, грабові, березові, вільхові та ясеневі породи дерев. Відомо, що соснові ліси є найбільш потенційно небезпечними об'єктами з огляду на лісові пожежі. Протягом останніх років збільшилась кількість виникнення лісових пожеж хвойних порід, здебільшого на Поліссі, а саме в Житомирській області. За результатами аналізу даних лабораторією екології УкрНДІЛГА впродовж 2000-2019 рр. в Україні було пошкоджено і знищено лісовими пожежами 51,4 тис. га лісових насаджень. У 2020 році втрата від лісових пожеж у Житомирській та Луганській областях України переходить межі десятка тисяч гектарів. Тому об'єктивна і своєчасна інформація про наслідки пожеж необхідна для вирішення широкого класу прикладних завдань лісового господарства, включаючи планування охорони і захисту лісів, лісочористування та лісовідновлення, актуалізацію даних про лісові ресурси.

1. Технологія визначення спалених пожежати територій. Для визначення територій, які були

вражені пожежами, використовуються дані космічних знімків, що були зроблені супутником Landsat 8, до та після пожежі відповідно. Знімки місять одну й ту ж географічну область місця пожеж Овруцького району. Для визначення спалених пожежею територій використовується порівняння значень нормалізованого індексу згарища NBR до та після пожежі, який розраховується за формулою:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR), \quad (1)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал (5 канал з табл. 1), SWIR – короткохвильовий інфрачервоний 2 канал (7 канал з табл. 1).

Даний індекс показує враження лісових територій пожежею. Результат розрахунку нормалізованого індексу згарищ зі шкалою від -1.00 до 1.00, де -1.00 – абсолютно не вражені території, а 1.00 – повністю вигорілі. Це показано на рис. 2, де розташовуються знімки до та після пожежі.

Для порівняння зміни індексу NBR між періодом до пожежі та після неї використовується показник DNBR, який знаходиться за формулою:

$$DNBR = (prefire\ NBR) - (postfire\ NBR), \quad (2)$$

де *prefire NBR* – показник індексу NBR до пожежі, *postfire NBR* – показник індексу NBR після пожежі.

Для визначення рівнів враження території отримані дані показника DNBR, які класифікуються: рівень зростаючої території (на графіку показано темно-зеленим кольором), неспаленої – світло-зеленим, низько-враженої – бежевим, середньо-враженої – помаранчевим та сильно-враженої території – темно-червоним (рис. 3). Вікно також містить спеціальне поле для виводу спаленої території в метрах квадратних, яка розраховується за отриманим показником.

Система експортує отримані дані про область пожеж в форматі GeoTIFF, що зберігає географічні координати об'єкту та забезпечує сумісність використання отриманої інформації з різними географічними системами.

2. Прогнозування настання лісової пожежі методом Байєса. Для прогнозування лісових пожеж та своєчасного їхнього попередження лісничим та інженерам з охорони лісу потрібно знати ймовірність їх виникнення протягом пожежонебезпечного періоду, яка буде залежати від таксаційних характеристик лісових насаджень та кліматичних умов, на території кожного лісництва. Для цього ми використовуємо теорему Байєса – це одна з основних теорем теорії ймовірностей, яка обчислює ймовірність події за умови, що інша подія, яка пов'язана з нею, вже відбулася. Формула Байєса допомагає більш точно поррахувати ймовірність події, враховуючи як і відомі дані, так і нові. Для практичного застосування формули потрібно проводити багато обчислень, тому байєсовські оцінки стали активно використовуватися з швидким розвитком інформаційних технологій.

Нехай подія K може відбутися лише одночасно з однією з гіпотези H_1, H_2, \dots, H_n , які утворюють повну групу несумісних подій, тобто $\sum_{i=1}^n P(H_i) = 1$.

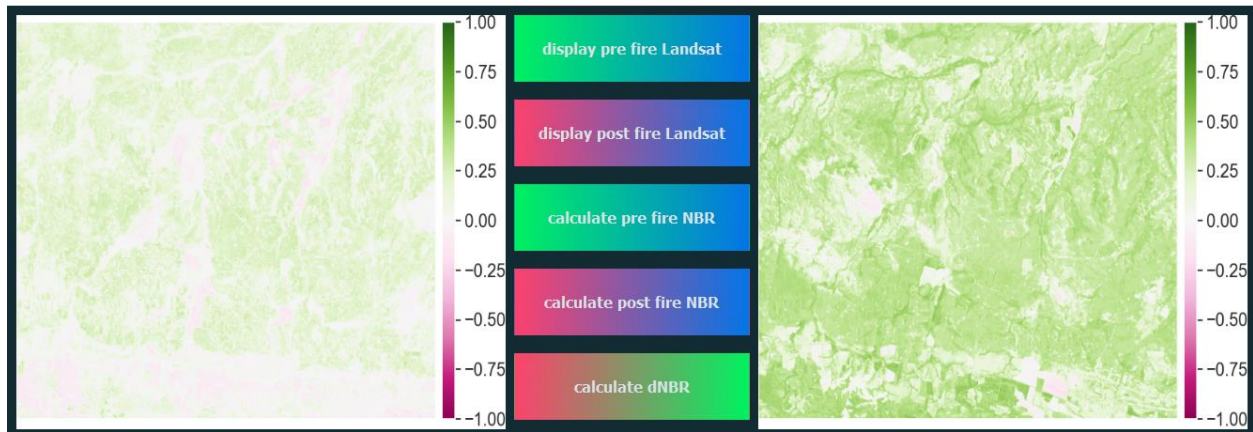


Рис. 2. Відображення індексів NBR до і після пожежі (Fig. 2. Display of NBR indices before and after the fire)

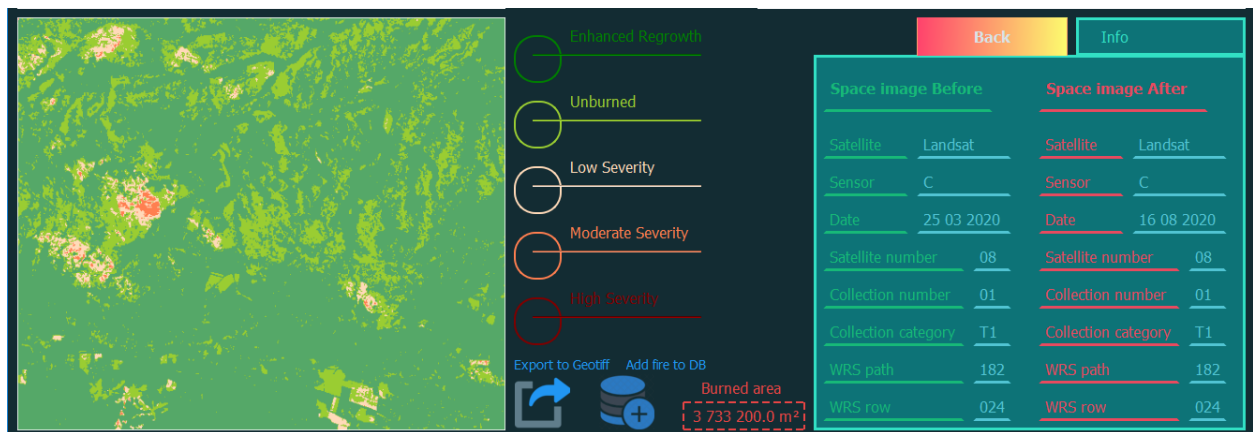


Рис. 3. Відображення показника індексу DNBR (Fig. 3. Display the DNBR index)

Тоді за теоремою Байеса ймовірність події K , яка може настати лише з появою однієї з подій H_i , дорівнює сумі добутків ймовірностей кожної з гіпотез на відповідну умовну ймовірність події K :

$$P(K) = \sum_{i=1}^n P(H_i) \cdot P(K/H_i). \quad (3)$$

Для події K характерний комплекс ознак k_1, k_2, \dots, k_v , які в свою чергу ще можуть поділятися на розряди $k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jm}$, за якими буде проводитися дослідження.

Тоді для визначення ймовірності гіпотези за умови, що подія K уже відбулася, використовується узагальнена формула Байеса:

$$P(H_i/K) = \frac{P(H_i) \cdot P(K/H_i)}{\sum_{i=1}^n P(H_i) P(K/H_i)}, \quad (4)$$

де $P(H_i)$ – апіорна ймовірність гіпотези H_i , K – подія, для якої характерний певний комплекс ознак k_1, k_2, \dots, k_v , n – загальна кількість можливих гіпотез, $P(H_i/K)$ – апостеріорна ймовірність гіпотези H_i після того, як стали відомі результати по комплексу ознак події K , $P(K/H_i)$ – ймовірність настання події K з гіпотезою H_i , яка обчислюється за формулою:

$$P(K/H_i) = P(k_1/H_i) \cdot P(k_2/H_i) \cdot \dots \cdot P(k_v/H_i). \quad (3)$$

Для прогнозування лісових пожеж, своєчасного їхнього попередження та швидкої ліквідації потрібно знати ймовірність їхнього виникнення протягом пожежонебезпечного періоду, яка залежить від таксаційних характеристик лісових насаджень.

Для аналізу було обране Можарівське лісництво в Овруцькому районі. Площа лісових угідь лісництва становить 8298 га. Маючи статистичні дані по всіх таксаційних характеристиках кварталу, зробимо оцінку пожежонебезпечності кожного кварталу окремо по всьому лісництву і визначимо класи пожежної небезпеки.

Нехай K – подія, яка характеризує виникнення пожежі в лісі. Площа лісових угідь Можарівського лісництва поділена на 85 кварталів, отже маємо гіпотези H_1, H_2, \dots, H_{85} . Для того, щоб визначити ймовірність кожної гіпотези, потрібно площу кварталу поділити на загальну площу всіх досліджуваних кварталів лісництва, тобто

$$P(H_i) = \frac{S_{H_i}}{S}. \quad (4)$$

Для прикладу візьмемо територію 64 кварталу. Ймовірність для цього кварталу дорівнює

$$P(H_{64}) = \frac{S_{H_{64}}}{S} = \frac{28,4}{286,5} = 0,10.$$

На виникнення пожежі впливають такі фактори: ознака k_1 – склад лісових насаджень, ознака k_2 – повнота насаджень, ознака k_3 – вік лісових насаджень, ознака k_4 – тип лісорослинних умов (ТЛУ). Для того, щоб визначити ймовірність появи k_i ознаки в кварталі H_i , потрібно поділити площу лісу в кварталі, який має ознаку k_i , на площу всього кварталу, тобто

$$P(k_{ij}/H_i) = S_{k_{ij}}/S_{H_i}. \quad (5)$$

Ознака k_1 – склад насадження – це частка деревних порід, які є в лісовому насажденні. Основними лісовими насажденнями в Можарівському лісництві є: k_{11} – сосна звичайна (Сз), k_{12} – береза повисла (Бп), k_{13} – дуб звичайний (Дз), k_{14} – вільха чорна (Влч), k_{15} – осика (Ос). Найбільш пожежонебезпечними є соснові насадження, тому для цієї ознаки із породного складу потрібно визначити площу території, де росте сосна звичайна. Для 64 кварталу маємо: $P(k_{11}/H_{64}) = 26,86/28,4 = 0,95$.

Ознака k_2 – повнота деревостану – це показник щільності стояння стовбурів на одиниці площі. Найбільш пожежонебезпечними є насадження з повнотою 0,7, 0,8, 0,9. Отже, можна виділити такі групи за повнотою насаджень: k_{21} – повнота 0,7 – 1; k_{22} – повнота 0 – 0,6. Визначимо ймовірність ознаки k_{21} для 64 кварталу: $P(k_{21}/H_{64}) = 24,1/28,4 = 0,85$.

Ознака k_3 – вік дерев – соснові молодняки віком до 40 років (група 2 і 3 класу) відносять до I класу природної пожежної небезпеки. У таких насадженнях пожежі майже завжди переходять у верхові, завдаючи значних ушкоджень, а ліквідація таких пожеж є складною. Отже, можна виділити такі групи віку: k_{31} – групи віку 2 і 3 (молодняки 1 і 2 класу до 40 років), k_{32} – групи 4-8 (інші, більше 40 років). Отже, визначаємо ймовірність для кожного класу пожежної небезпеки в 64 кварталі:

- I клас пожежної небезпеки – насадження групи віку 2 і 3:

$$P(k_{31}/H_{64}) = S_{k_{31}}/S_{H_{64}} = 6,1/28,4 = 0,21,$$

- II-IV класи пожежної небезпеки – групи віку 4-8:

$$P(k_{32}/H_{64}) = S_{k_{32}}/S_{H_{64}} = 22,3/28,4 = 0,79.$$

Ознака k_4 – тип лісу – це ділянка лісу або їх сукупність, які характеризуються єдиним ТЛУ, однаковим складом деревних порід, кількістю ярусів,

$$P(H_{64})P(K_1/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{31}/H_{64})P(k_{41}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,21 \cdot 0,21 = 0,004,$$

$$P(H_{64})P(K_2/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{32}/H_{64})P(k_{42}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,79 \cdot 0,78 = 0,05,$$

$$P(H_{64})P(K_3/H_{64}) = P(H_{64})P(k_{11}/H_{64})P(k_{21}/H_{64})P(k_{32}/H_{64})P(k_{43}/H_{64}) = 0,10 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,79 \cdot 0,01 = 0,0006.$$

аналогічною фауною і потребують однакових лісогосподарських заходів при рівних економічних умовах. Основними є бір, суббір, сугруд, груд. Найбільш пожежонебезпечними є насадження в борах та суборах з індексами 0, 1 – I клас пожежної небезпеки, та індексом 2 – (II клас пожежної небезпеки (табл. 2).

Таблиця 2 – Класи пожежної небезпеки (ПоН) в лісі за типом ТЛУ для насаджень більше 40 років

Ознака	Клас ПоН	ТЛУ	Пояснення
k_{41}	I	A0C	Дуже сухий сосновий бір
		A1C	Сухий сосновий бір
		B1ДС	Сухий дубово-сосновий суббір
k_{42}	II	C1ГДС	Сухий грабово-дубово-сосновий сугруд
		A2C	Свіжий сосновий бір
		B2ДС	Свіжий дубово-сосновий суббір
		C2ГДС	Свіжий грабово-дубово-сосновий сугруд
k_{43}	III	A3C	Вологий сосновий бір
		A4C	Сирий сосновий бір
		B3ДС	Вологий дубово-сосновий суббір
		B4ДС	Сирий дубово-сосновий суббір
		C3ГДС	Вологий грабово-дубово-сосновий сугруд
k_{44}	IV	A5C	Мокрий сосновий бір
		B5BC	Мокрий березово-сосновий суббір
		C5ВЛЧ	Вологий чорновільховий сугруд

Отже, рахуємо ймовірність по кожному класу пожежної небезпеки в 64 кварталі за ознакою k_4 :

- I клас пожежної небезпеки – насадження менше 40 років всіх індексів та насадження більше 40 років з індексами 0,1:

$$P(k_{41}/H_{64}) = P(k_{31}/H_{64}) = \frac{S_{k_{31}}}{S_{H_{64}}} = \frac{6,1}{28,4} = 0,21;$$

- II клас пожежної небезпеки – насадження більше 40 років з індексом 2:

$$P(k_{42}/H_{64}) = \frac{S_{k_{42}}}{S_{H_{64}}} = \frac{21,9}{28,4} = 0,78;$$

- III клас пожежної небезпеки – насадження більше 40 років з індексами 3,4:

$$P(k_{43}/H_{64}) = \frac{S_{k_{42}}}{S_{H_{64}}} = \frac{0,4}{28,4} = 0,01.$$

Порахуємо ймовірність настання пожежі в 64 кварталі з урахуванням класів пожежної небезпеки K_1, K_2, K_3 відповідно:

Отже, що в 64 кварталі найімовірніше II клас пожежної небезпеки. Аналогічно для всіх інших кварталів за формулою (3) визначаємо класи пожежної небезпеки.

У Можарівському лісництві виявлено I-IV класи пожежної небезпеки: I клас – 6485,6 га, II клас – 1210,3 га, III клас – 516 га та IV клас – 86,1 га.

Тепер за формулою Байєса (4) для кожного кварталу робимо оцінку настання пожежі за умови, що там уже виявлено один з класів пожежної небезпеки K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 , тобто

$$P(H_i/K_m) = \frac{P(H_i)P(K_1/H_i)}{P(K_m)}, m = 1, 2, 3, 4, 5.$$

Для 64 кварталу, де був виявлений II клас пожежної небезпеки, ймовірність настання пожежі становить

$$P(H_{64}/K_2) = \frac{P(H_{64})P(K_2/H_{64})}{P(K_2)} = \frac{0,05}{0,077} = 0,65.$$

3. Створення картографічної бази даних для оцінки ймовірності пожеж в лісових масивах

Як описано вище, ймовірність виникнення пожежі в певному лісовому кварталі визначається породно-віковим складом виділів, що знаходяться в оцінюваному кварталі, та станом зволоження ґрунтів в цьому виділі (табл. 3, 4). Для розрахунку ймовірності сформована картографічна база, що описує характеристики лісових кварталів та виділів. База даних включає два основні класи об'єктів, атрибути яких приведені нижче, та класифікаторів «Основний елемент лісу», «Вікова група», «Ознака вологості».

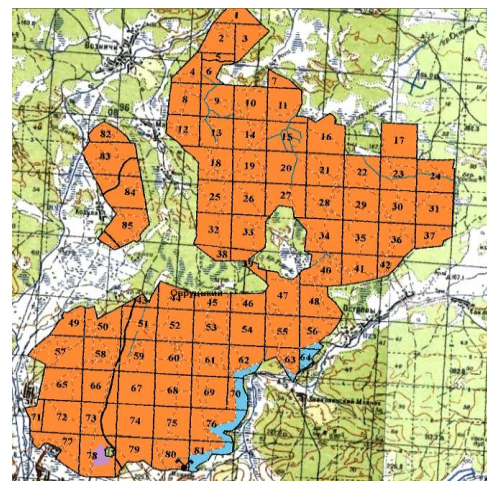
Таблиця 3. Клас лісових кварталів

Назва атрибута	Тип даних	Пояснення
KvartalNumber	Integer	Номер квартала
KvartalName	Text	Позначення квартала
PirologyValue	Float	Пожежний індекс
Area	Float	Площа квартала

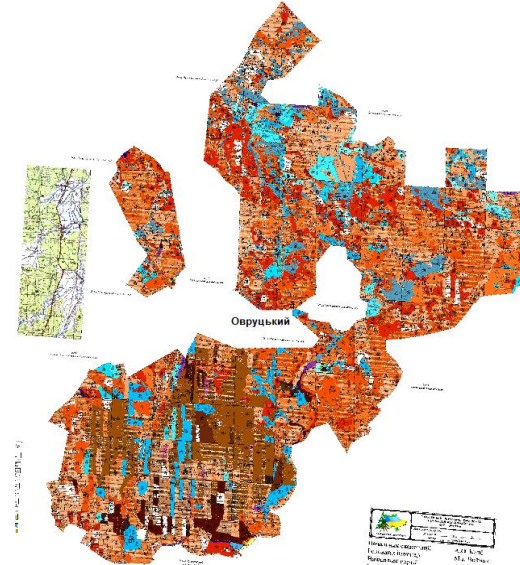
Таблиця 4. Клас лісових виділів

Назва атрибута	Тип даних	Пояснення
VydilNumber	Integer	Номер квартала
VydilName	Text	Позначення квартала
PirologyValue	Float	Пожежний індекс
Area	Float	Площа квартала
ForestElement	Integer	Основний елемент лісу
OldGroup	Integer	Вікова група

Картографічна база даних була наповнена шляхом оцифровки растрових карт Можарівського лісництва (рис. 4). Результатом оцифровки є векторні шари кварталів та виділів з визначеними характеристиками лісових угідь, на основі яких розраховані ймовірності виникнення пожеж в лісових кварталах. На рис. 5 приведена тематична карта розподілу ймовірностей виникнення пожежі, розрахована за формулою Байєса, де кольорами позначені класи пожежної небезпеки: I клас – синій, II клас – червоний, III клас – оранжевий, IV клас – зелений.



а



б

Рис. 4. Растрова карта лісових кварталів (а) та лісових виділів (б) Можарівського лісництва (Fig. 4. Raster map of forest quarters (a) and forest allotments (b) of Mozhariv forestry)

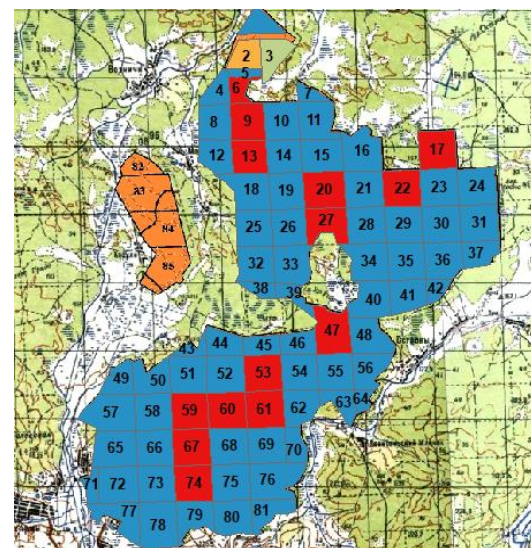


Рис. 5. Тематична карта розподілу ймовірностей виникнення пожежі (Fig. 5. Thematic map of the distribution of fire probabilities)

Цікавим є суміщення тематичної карти з растровим шаром пожежного індекса (рис. 6), що одержаний методом визначення спалених пожежами територій за допомогою формулам (1) та (2).

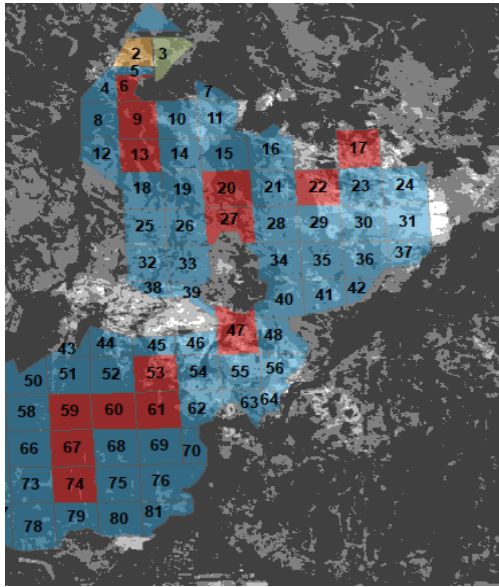


Рис. 6. Суміщення тематичної карти ймовірностей пожежі з шаром визначених наслідків пожежі
(**Fig. 6.** Combining the thematic map of fire probabilities with a layer of defined consequences of the fire)

Суміщення карти з растровим шаром показує, що наша прогнозна модель є правильною і її можна

використовувати спеціалістам в галузі лісового господарства.

Висновки

Розроблено інформаційну систему аналізу наслідків лісових пожеж із використанням технологій ДЗЗ та зроблено прогноз щодо виявлення пожежо-небезпечних територій. Проведено актуалізацію стану лісових угідь з використанням космічних знімків на основі керованої класифікації методом Байеса. Проаналізовано результати визначень нормалізованого індексу згарища NBR до та після пожежі на основі космічних знімків, зроблених супутником Landsat 8 протягом літнього періоду 2020 року в Овруцькому районі Житомирської області України. Також створено прогнозу модель ймовірного настання лісової пожежі методом Байеса. Створена тематична карта з розподіленням класів пожежної небезпеки по кожному лісовому кварталу. Для перевірки точності результатів створеної прогнозу моделі проведено суміщення тематичної карти з шаром визначених територій згарищ.

Дана інформаційна система є зручним і універсальним програмним продуктом, здатним адаптуватись до будь-якої лісової макросистеми. Подальшим напрямком вдосконалення є впровадження штучного інтелекту та машинного навчання, що дозволить ще більш точно та з максимальною швидкістю отримувати результат аналізу для швидкого реагування та прийняття рішень.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Слободяник М.П. Використання методів ДЗЗ та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів. *Вісник геодезії та картографії*. № 1(88). 2014. С.27–31.
2. Миرونюк В.В. Перспективи використання методу класифікації космічних знімків для лісової інвентаризації України. *Збалансоване природокористування*. № 2. 2015. С. 9–15.
3. Токар О., Король М., Гаврилюк С., Цуняк А. Використання супутникових знімків для оцінювання таксаційних показників лісових насаджень. *Міжвідомчий науково-технічний збірник «Геодезія, картографія і аерофотознімання»*. № 85. 2017. С.84-93.
4. Поморцева О.Є. Моделювання розташування екологічно небезпечних об'єктів за допомогою геоінформаційних систем. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. Т. 29(68), № 6, Ч.2. 2018. С. 222 – 226.
5. Зацерковний В., Савков П., Пампуха І., Васецька К. Застосування технологій ГІС та ДЗЗ в задачах моніторингу лісових пожеж. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки*. № 2(44). 2020. С. 54–58.
6. Shvaiiko, V., Bandurka, O., Shpuryk, V., & Havrylko, Y. V. Methods for detecting fires in ecosystems using low-resolution space images. *Informatyka, Automatyka, Pomiaru W Gospodarce I Ochronie Środowiska*. No 11(1). 2021. Pp. 15-19.
7. Барабаш О., Бандурка О., Шпурік В., Свинчук О. Інформаційна система аналізу геоданих для відслідковування змін рослинності. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 4. С. 17–25. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.03>
8. Худов В., Кучук Г., Маковейчук М., Крижний А. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптико-електронного спостереження. *Системи обробки інформації*. 2016. С. 77–80.
9. Kuchuk N., Kovalenko A., Tkachov V., Kuchuk H. Predicting traffic anomalies in container virtualization. *Computer and Information System and Technologies*. 2021. P. 25-26.
10. Васильев А.С., Краснящих А.В., Коротаев В.В., Лашманов О.Ю. и др. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений. *Приборостроение*. Т.55, № 12. 2015. С. 50–55.
11. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунев Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физико-математическая литература, 2000. 352 с.
12. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и её приложения. *Физика горения*. Том 32, № 5, Томск, 2000. С. 35–54.
13. Куценко Л.М., Васильев С.В. Моделювання зовнішніх проявів надзвичайних ситуацій, як двофазних гетерогенних процесів. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. Збірка наукових праць. Випуск 8. 2008. С. 115–123.
14. Грабарник П.А., Чертов О.Г., Чумаченко С.Г. Интеграция имитационных моделей для комплексной оценки экосистемных услуг лесов: методические подходы. *Информационные и вычислительные технологии в биологии и медицине*. Том 14, № 2. 2019. С. 488–499.
15. Макаров И.М., Лохина В.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. М.: Физико-математическая литература, 2001. 576 с.

16. SDK [Электронный ресурс] / Wikimedia Foundation Inc. Сан-Франциско., 2009. URL: [http:// ru.wikipedia.org/wiki/SDK](http://ru.wikipedia.org/wiki/SDK)
17. Комаров А.С., Чертов О.Г., Быховец С.С., Припутина И.В., Шанин В.Н., Видягина Е.О., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Воздействие осинового плантаций с коротким оборотом рубки на биологический круговорот углерода и азота в лесах борельной зоны: модельный эксперимент. *Математическая биология и биоинформатика*. 2015. Т. 10. № 2. С. 398–415.
18. Припутина И.В., Фролова Г.Г., Быховец С.С., Шанин В.Н., Лебедев В.Г., Шестибратов К.А. Моделирование продуктивности лесных плантаций при разных схемах пространственного размещения деревьев. *Математическая биология и биоинформатика*. 2016. Т. 11. № 2. С. 245–262.

Received (Надійшла) 17.12.2021

Accepted for publication (Прийнята до друку) 26.01.2022

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

Барабаш Олег Володимирович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», Київ, Україна;
Oleg Barabash – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: bar64@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1715-0761>.

Бандурка Олена Іванівна – аспірантка кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів і систем, Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна;
Olena Bandurka – Phd student of the Department of Automation of projection of power processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky KPI”, Kyiv, Ukraine;
 e-mail: o.i.bandurka@ukr.net; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8059-1861>.

Моделирование лесных пожаров на основе прогностической модели Байеса и геоинформационных технологий

О. В. Барабаш, Е. И. Бандурка

Аннотация. Сегодня разнообразную информацию о лесных экосистемах можно получить с помощью методов дистанционного зондирования Земли. Использование космических данных мониторинга лесов является экономически выгодным, так как позволяет быстро получать объективную информацию, необходимую лесоводам для решения практических задач. Спутниковые данные обеспечивают обширный охват лесных угодий, высокую точность результатов, а также высокую частоту полученных данных. Для исследования были выбраны космические снимки территории Овручского района Житомирской области Украины летом 2020 года. Определение породного состава проведено методами управляемой классификации, а именно классификатором Байеса. Установлено, что 70% лесов являются сосновыми, в меньшем количестве встречаются осиновые, грабовые, березовые, ольховые и ясеневые породы деревьев. По статистическим данным на протяжении 2000-2020 гг. в Украине было повреждено и уничтожено лесными пожарами 51,4 тыс. га лесных насаждений. Поэтому объективная и своевременная информация о последствиях пожаров необходима для решения широкого класса прикладных задач лесного хозяйства. Важной задачей при оценке эколого-экономического ущерба, нанесенного лесному хозяйству вследствие лесных пожаров, является определение площади поврежденных лесов. В работе рассматривается технология определения территории леса, где прошел пожар, с использованием космических снимков спутника Landsat 8. Для обнаружения сожженных пожаром территорий и уровней впечатления используется нормализованный индекс пожара NBR до и после пожара и индекс DNBR. Для прогнозирования лесных пожаров создана математическая модель на основе теоремы Байеса и создана тематическая карта с классами пожарной опасности поквартально. Для проверки точности результатов созданной прогнозной модели произведено совмещение тематической карты со слоем определенных территорий пожаров. Данный программный продукт достаточно гибок и универсален, он может быть легко адаптирован для применения не только для определения сожженных лесных угодий, но и для других территорий.

Ключевые слова: моделирование лесных пожаров; информационная система; космические снимки; дистанционное зондирование Земли; Quantum GIS; индекс пожаров; формула Байеса; вероятность пожара.

Modeling of forest fires based on the Bayesian forecast model and geoinformation technologies

Oleg Barabash, Olena Bandurka

Abstract. Today, a variety of information about forest ecosystems can be obtained using remote sensing methods. The use of space data for forest monitoring is cost-effective because it allows you to quickly obtain the objective information needed by foresters to solve practical problems. Satellite data provide wide coverage of forest lands, high accuracy of results, as well as high frequency of data obtained. Space images of the Ovruch district of the Zhytomyr region of Ukraine in the summer of 2020 were selected for the study. Determination of breed composition was carried out by the methods of controlled classification, namely the Bayesian classifier. It was found that 70 % of forests are pine, less aspen, hornbeam, birch, alder and ash tree species. According to statistics, during 2000-2020, 51.4 thousand hectares of forest plantations in Ukraine were damaged and destroyed by forest fires. Therefore, objective and timely information on the consequences of fires is needed to solve a wide range of applied problems of forestry. An important task in assessing the environmental and economic damage caused to forestry as a result of forest fires is to determine the area of damaged forests. The paper considers technologies for determining the area of the forest where the fire took place, using space images of the Landsat 8 satellite. The normalized NBR fire index before and after the fire and the DNBR index are used to identify areas burned by fire and impression levels. To predict forest fires, a mathematical model based on Bayes' theorem was created and a thematic map with fire hazard classes on a quarterly basis was created. To check the accuracy of the results of the created forecast model, the thematic map was combined with a layer of defined fire areas. This software product is quite flexible and versatile, it can be easily adapted for use not only to identify burned forest lands, but also for other areas.

Keywords: information system; space imagery; remote sensing of the Earth; Quantum GIS; fire index; Bayesian formula; probability of fire.