

Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедеменко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

Комплексний аналіз характеристик лісових пожеж та метеорологічних умов, що впливають на їхнє розповсюдження, на території Українського Полісся за період 2006–2022 рр.

Ключові слова:

природні пожежі,
індекс пожежної небезпеки,
статистичний аналіз
характеристик пожежі,
кліматичні моделі,
супутникова інформація,
метеорологічна ситуація,
радіонукліди

Досліджено просторово-часові характеристики природних пожеж на території Українського Полісся з урахуванням впливу метеорологічних факторів та локальних умов місцевості. Виконано статистичний аналіз характеристик лісових пожеж на території шести регіонів, закріплених за метеостанціями, за обробленими даними (сумарними даними за місяць, рік) про пожежі за період 2006–2022 рр. Відзначено: 1) річна кількість пожеж збільшилася у три рази, а площі загорання у 12 разів, досягаючи в окремі роки від 825 км² (2014 і 2020 рр.) до 1653 км² (2015 р.); 2) найбільша кількість загорань спостерігалася на території агроландшафту, загалом від 70 до 90 % від площі регіону. За відносно короткий період (16 років) відзначається динаміка зростання річних сум площ загорання. Описано екстремальні випадки з максимальним числом точок загорання (від 1500 до 1800) з площею до 100–120 км² на території метеостанцій м. Коростень та м. Сарни з детальним аналізом погодних умов. Використані дані проєкту Copernicus: три глобальні набори кліматичних даних, дані характеристик пожеж та чотири індекси пожежної небезпеки, щоб проаналізувати використання показників пожежонебезпечної погоди для оцінки пожежонебезпеки в умовах екстремальних випадків. Описано вплив метеорологічних умов та синоптичної ситуації на поширення пожеж територією, вільною від лісових масивів з використанням архіву синоптичних карт для Європейської території та сучасних геоінформаційних технологій. Відзначено вплив великомасштабних природних факторів та місцевих локальних умов на рівень пожежної небезпеки території регіону, що розглядається. Результати виконаних досліджень та можливість використання погодних показників пожежонебезпеки, отриманих з використанням архівних даних чи кліматичних моделей, дадуть змогу покращити оцінки вторинного радіоактивного забруднення середовища внаслідок лісових пожеж у зоні відчуження на території Українського Полісся.

Вступ

Лісові пожежі залишаються одним із найпотужніших природних катастрофічних явищ і водночас є природною особливістю у функціонуванні багатьох

екосистем. Взаємодія між рослинністю та кліматичними умовами протягом тривалих періодів часу встановлює особливу схему повторення лісових пожеж у певній екосистемі, відому як її режим пожеж. Відхилення від переважаючого режиму пожеж — часу,

© Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедеменко, 2024. Ліцензія CC BY 4.0

частоти, розміру та інтенсивності лісових пожеж — можуть призвести до значних екологічних змін як у пожежозалежних екосистемах, яким для зростання та розвитку потрібні пожежі, так і в пожежочутливих екосистемах, де пожежі приносять більше негативних, ніж позитивних наслідків [1, 2]. З 2003 до 2016 р. в усьому світі сталося понад 13 млн окремих пожеж, кожна тривалістю 4–5 діб. У середньому при кожному загоранні вигорала площа 440 га по всьому світі. Сезони пожежонебезпечної погоди поширилися на 29,6 млн км² (25,3 %) поверхні Землі, вкритої рослинністю, що призвело до збільшення середньої тривалості глобального сезону пожежонебезпечної погоди на 18,7 %, подвоєння (збільшення на 108,1 %) глобальної площі, що вигорає, порушеної тривалими сезонами пожежонебезпечної погоди та збільшенням глобальної частоти тривалих сезонів такої погоди на 62,4 млн км² (53,4 %) за період 1979–2013 рр.[2]. У звіті щодо України [3] показано, що за 30 років (1980–2010 рр.) кількість та площа природних пожеж, у тому числі лісових, характеризуються стійкою тенденцією до збільшення. Зокрема, у період 1980–1989 рр. кількість пожеж варіювала з 792 до 2377 випадків на рік, за 1990–1999 рр. цей показник збільшився більше, ніж удвічі, з 1818 до 6743 і зберігся на рівні 3205–6383 на рік за період 2000–2010 рр. Річна кількість пожеж за вказаний період стабільно збільшилася в 2,6 раза, тоді як середній показник «річна площа пожеж» змінювався таким чином: а) 1980-і роки: 1673 пожежі/1176 га; б) 1990-і роки: 3917 пожеж/3962 га; в) 2000–2010 рр.: 4367 пожеж/2006 га.

Більшість пожеж відбувається з вини відвідувачів лісу (до 93–96 % в окремі роки), до 4 % викликані іскрами від транспортних засобів, до 3 % стається від сільськогосподарських спалювань, до 1 % — від різної господарської діяльності на лісгосподарських землях [4]. Сільськогосподарські пожежі є другою за поширеністю причиною лісових пожеж. Загалом, згідно з аналізом супутникових знімків, 70 % від загальної кількості лісових пожеж в Україні — це сільськогосподарські та лугопасовищні пожежі. Часто сільськогосподарські підприємства незаконно проводять підпали на сільськогосподарських полях після збирання сільськогосподарських культур або населення спалює рослинні залишки на невеликих городах. Вогонь поширюється, пожежі проникають у ліси та можуть призвести до великих пожеж [1–4].

Площі покритих лісами територій в Україні становлять близько 10 млн га. Рівень лісистості в країні (відношення площі, вкритої лісовою рослинністю,

до загальної площі території) за підсумками 2009 р. становить близько 16 %, що на 4 % менше від оптимального рівня. Українське Полісся лежить у зоні мішаних лісів. З лісів переважають соснові (бори), дубово-соснові та дубово-грабові. У лісах рослини ростуть ярусами. Верхній ярус утворюють дерева, середній, який називають підліском, — кущі, нижній — трав'янисті рослини та гриби. У північній частині зони мішаних лісів із хвойних дерев переважає сосна звичайна, а з листяних — дуб звичайний. На південь, крім дуба, разом із сосною ростуть граб, береза, липа, осика, клен, вільха. Підлісок утворюють кущі ожини, шипшини, барбарису, ліщини, малини. На заболочених місцях поширені брусниця та чорниця [4–6].

На сьогоднішній день дослідження в галузі оцінки та прогнозування наслідків лісових пожеж інтенсивно ведуться як за кордоном, так і в нашій країні [6–12]. Просторово-часові характеристики цього небезпечного природного явища вивчаються з урахуванням змін погодних умов, використовуючи дані глобальних і регіональних прогностичних кліматичних моделей і щоденні дані супутникового моніторингу територій різних країн (MODIS Terra і Aqua, VIIRS) [11, 13].

Метою цього дослідження було виявлення просторового розподілу характеристик природних пожеж на території Українського Полісся, забрудненої радіонуклідами після аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС), з оцінкою впливу метеорологічних умов на характер та площу поширення пожеж за період 2006–2022 рр. При аналізі використовувалися дані супутникового моніторингу територій різних країн (MODIS Terra та Aqua, VIIRS) та дані мережі гідрометеорологічних спостережень для періодів вибраних випадків з екстремальною кількістю вогнищ загорянь на території Полісся. Комплексна оцінка характеристик пожеж та метеорологічних параметрів була проведена з використанням засобів геоінформаційної системи MapInfo та за допомогою статистичного апарату аналізу часових рядів з оцінкою статистичної значущості використовуваних характеристик.

Для окремих випадків з максимальними пожежами було проведено оцінку пожежної небезпеки із застосуванням різних способів розрахунку показника пожежної небезпеки за погодними параметрами.

Використані матеріали та територія досліджень

У розвитку природних пожеж основну роль відіграють кліматичні умови, топографія та тип лісу.

Лісові пожежі під впливом багатьох умов розподіляються за територією і в часі дуже нерівномірно. Умови, що впливають на виникнення та поведінку пожеж, можна розділити на три основні групи: лісорослинні (постійні), метеорологічні (змінні), а також додаткові, до яких віднесемо грозову активність та антропогенне навантаження. Вплив цих умов виражається оцінкою лісопожежної небезпеки з використанням метеорологічних параметрів: FWI¹ [12–14] та модифікований показник Нестерова (РРО_н²) [15, 16], що відображає баланс посушливих та зволожуючих факторів погоди.

Комплексна оцінка умов виникнення та розповсюдження природних пожеж проводилася з використанням поточних метеорологічних даних, даних кліматичних моделей за період 2006–2022 рр., супутникових даних про характеристики природних пожеж, отриманих за проектами Copernicus.eu та NASA.gov. Інформаційні матеріали, що використовувалися, представлені такими наборами даних:

1) набір архівних даних (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cems-fire-historical?tab=overview>) (FWI-ERA5, період 2006–2022 рр.), що забезпечує повну історичну реконструкцію метеорологічних умов, сприятливих для виникнення, поширення та стійкості пожеж. У цьому наборі даних індекси пожежної небезпеки розраховані за допомогою прогнозу погоди на

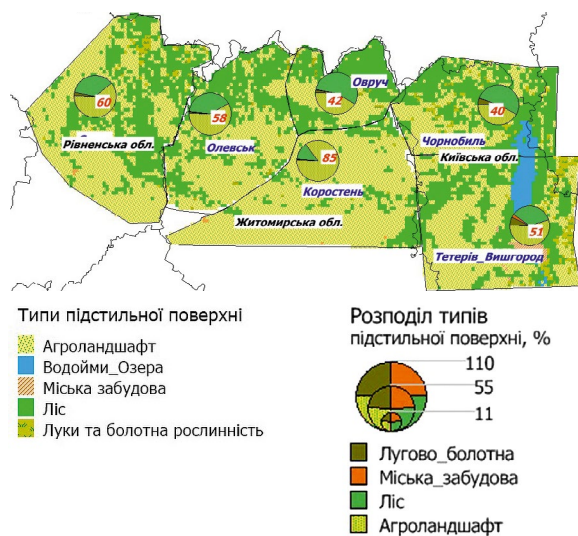
основі історичного моделювання, наданого реаналізом ERA5 ECMWF [17, 18];

2) набір прогностичних даних FWI (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/sis-tourism-fire-danger-indicators?tab=overview>), отриманих за допомогою глобальних та регіональних кліматичних моделей [19–21];

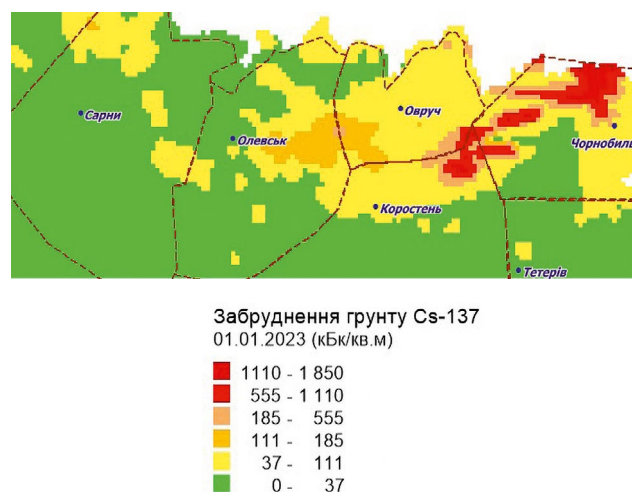
3) набір поточної (<https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>, період 2006–2020 рр.) метеорологічної інформації (температура повітря, відносна вологість, кількість опадів, швидкість вітру, що інтерполюються у вузли регулярної сітки (1 × 1 км) та співмірних з метеостанцією даного регіону [22];

4) набір даних характеристик пожеж (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>, період 2006–2023 рр.), отриманих за допомогою спектральних радіометрів середньої роздільної здатності (MODIS) з платформ Terra та Aqua, а також набір радіометрів візуалізації видимого інфрачервоного діапазону (VIIRS) (375 м) з платформ Suomi NPP та NOAA-20 [23, 24].

Статистичний аналіз даних щодо характеристик лісових пожеж за період 2006–2020 рр. було проведено територією радіоактивного забруднення Українського Полісся з метою виявлення особливостей просторових географічних та метеорологічних умов займання лісових пожеж для шести регіонів,



а



б

Рис. 1. Територія досліджень із просторовим розподілом типів підстильної поверхні (а) та радіоактивного забруднення ґрунту ¹³⁷Cs (б)

¹ Fire Weather Index – стандартизований індекс пожежної небезпеки, що викликана погодними умовами.

² Показник пожежної небезпеки В. Г. Нестерова.

Таблиця 1. Характеристика території досліджень

Регіон метеостанції	Площа, км ²	Тип підстильної поверхні, площа у %			Середня висота місцевості, м	Середнє забруднення ґрунтів на 2023 р., кБк/м ²
		Лугово-болотна рослинність	Ліс	Агроландшафт		
Чорнобиль	5520	4,5	51,0	40,5	125,0	260
Коростень	7940	0,7	14,5	85,0	180,0	82
Олевськ	6180	1,0	41,0	58,0	195,0	53
Овруч	2942	2,9	56,0	42,0	165,0	103
Сарни	9013	2,7	36,5	60,2	170,0	30
Тетерів, Вишгород	8320	6,5	34,0	51,0	115,0	38

закріплених за метеостанціями загальною площею 39 915 км² (рис. 1).

Детальні дані про розподіл типів підстильної поверхні (ліси, агроландшафти, лучно-болотна рослинність, водна поверхня, міська забудова), середню висоту місцевості та середній рівень радіоактивного забруднення ґрунтів ¹³⁷Cs станом на 2023 р.³ наведено у табл. 1.

Як видно з табл. 1, на 85 % території, закріпленої за метеостанцією м. Коростень, розташовані агроландшафти (середня висота місцевості 190 м) і лише на 14 % – лісова рослинність. По території, що закріплена за метеостанцією м. Сарни, агроландшафти займають 60 %, а лісові масиви – 40 %. Агроландшафт переважає територіями метеостанцій міст Олевськ і Тетерів. У регіонах метеостанцій міст Чорнобиль та Овруч просторовий розподіл агроландшафту та лісових територій відповідно у відсотках (40/51, 41/56). Слід зазначити, що в Чорнобильському регіоні близько 28 % території має забруднення ¹³⁷Cs > 185 кБк/м² (>5 Ки/км²), у Коростенському – близько 7 %.

Досі ¹³⁷Cs та ⁹⁰Sr роблять істотний внесок у радіоактивне забруднення лісової деревини в деяких районах України, забруднених унаслідок аварії на ЧАЕС. Наприклад, у дослідженні М. М. Лазарева та співавторів [27] показано, що забруднення деревини ¹³⁷Cs все ще зберігається в Житомирській області, що була однією з областей України, яка найбільше постраждала від Чорнобильської аварії. Концентрація питомої активності ¹³⁷Cs у пробах попелу дров, отриманих від приватних домогосподарств цього району, суттєво варіювала – від 230 до 32 900 Бк/кг, що було зафіксовано в м. Народичі. Крім того, приблизно в 30 % проб попелу з цього міста концентрація питомої ак-

тивності ¹³⁷Cs перевищувала 10 000 Бк/кг, що можна віднести до низькоактивних радіоактивних відходів, які підлягають регульованому контролю згідно з українськими нормами [28]. Оцінки забруднення лісової деревини ⁹⁰Sr, представлені в роботі [27], дають змогу припустити, що є висока ймовірність того, що у дровах, заготовлених у більшості лісів Іванківського району, рівень забруднення ⁹⁰Sr може перевищувати 60 Бк/кг. Лише невелика частина лісів, розташованих у східній частині Іванківського району, швидше за все, відповідатиме українським гігієнічним нормам, що висуваються до дров. Концентрація активності ⁹⁰Sr в деревині лісів, розташованих на великих територіях північно-східної частини Іванківського району, могла перевищувати допустимий рівень (ДР) ⁹⁰Sr для дров у 8 разів. Слід очікувати, що ліси, що ростуть на цих територіях, ще можуть бути радіоактивно забруднені вище ДР протягом періоду, що перевищує три періоди напіврозпаду ⁹⁰Sr (понад 87 років) [29].

На рис. 2 представлено просторовий розподіл точок загорання (2016–2020 рр.) за типами підстильної поверхні, території радіоактивного забруднення після аварії 1986 р. на ЧАЕС. Аналіз просторових даних показує, що на території радіоактивного забруднення (регіони метеостанцій міст Чорнобиль, Овруч та Олевськ) здебільшого спостерігалися лісові пожежі.

Просторово-часовий аналіз динаміки характеристик пожеж спільно з метеорологічними параметрами

Проведено статистичний аналіз даних про характеристики природних пожеж, метеорологічні умови,

³ <https://www.umat.org/2021/09/28/monitoring-radioaktivnih-rechovin-u-vodojmah-ta-gruntah.htm>.

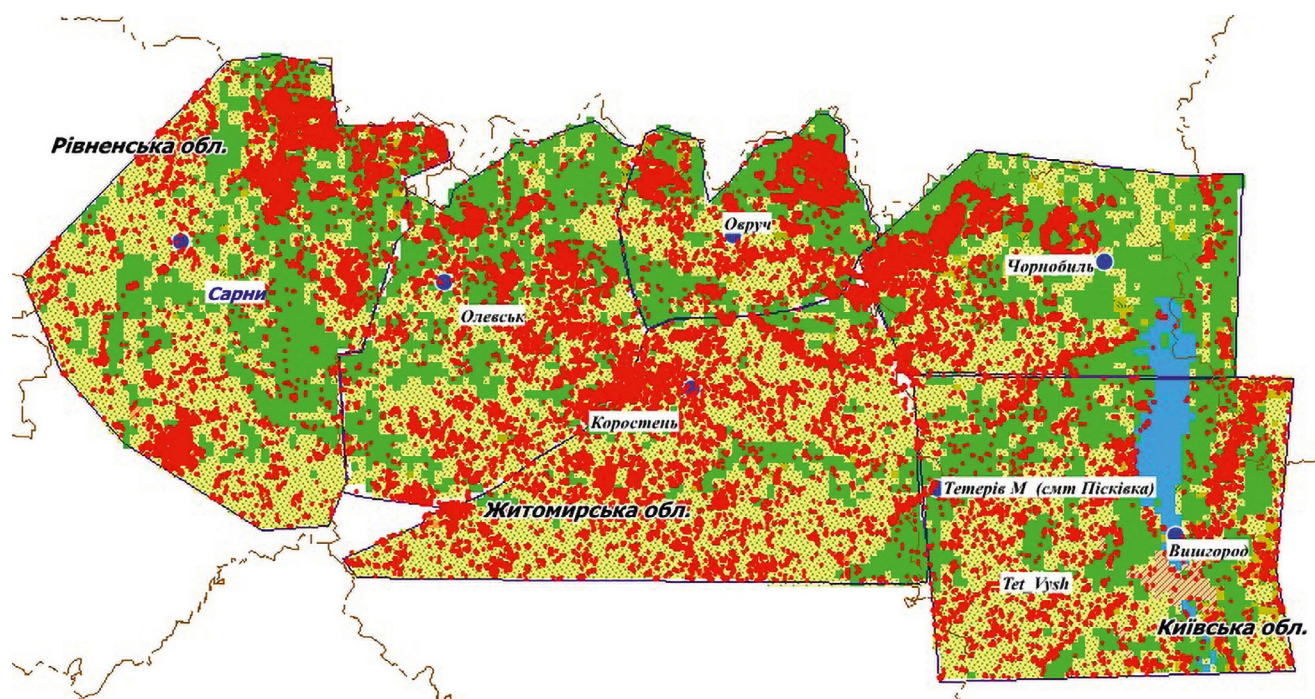


Рис. 2. Територія пожеж за період 2016–2020 рр.

що супроводжують розглянуті пожежі за таким алгоритмом:

оцінено динаміку числа загорань за роками та регіонами за період 2006–2022 рр.;

оцінено динаміку кількості діб із пожежами по територіях, закріплених за метеостанціями у період 2006–2022 рр.;

проведено розрахунок числа загорань / кількості діб за роками та територіями обраних метеостанцій (2006–2022 рр.);

розраховано загальну кількість випадків загорань за територіями метеостанцій та окремо для агро-

ландшафту (%) від загальної кількості випадків за п'ятирічними періодами;

вибрано дати з максимальним числом загорань на території дослідження;

представлено динаміку метеорологічних параметрів разом із характеристиками пожеж, дано опис синоптичних ситуацій з екстремальними випадками природних пожеж.

Результати порівняльного аналізу розподілу числа випадків спалахів за п'ятирічні періоди наведено в табл. 2. Виділено періоди з 2006 по 2020 рр. за п'ятирічками для регіонів м. Коростень та м. Сарни

Таблиця 2. Загальна кількість випадків спалахів за територіями метеостанцій та окремо для агроландшафту (%) від загальної кількості випадків за п'ятирічними періодами

Регіон метеостанції	2006–2010 рр.			2011–2015 рр.			2016–2020 рр.			2021–2023 рр. (01.01.21–01.09.23)		
	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього	Агро	%	Всього
Чорнобиль	540	74,7	723	3010	62,9	4786	2020	47,6	4245	1955	42,7	4581
Коростень	1827	93,7	1950	9655	92,1	10484	5127	86,4	5935	1074	72,8	1476
Олевськ	686	65,0	1055	4746	72,2	6577	2901	57,1	5078	448	70,7	634
Овруч	319	71,4	447	1281	57,3	2237	943	25,1	3755	471	46,4	1015
Сарни	675	72,0	937	8731	59,5	14678	5451	58,8	9272	1534	68,2	2248
Тетерів — Вишгород	1292	74,3	1738	5409	67,0	8073	2253	60,5	3725	3582	71,2	5033

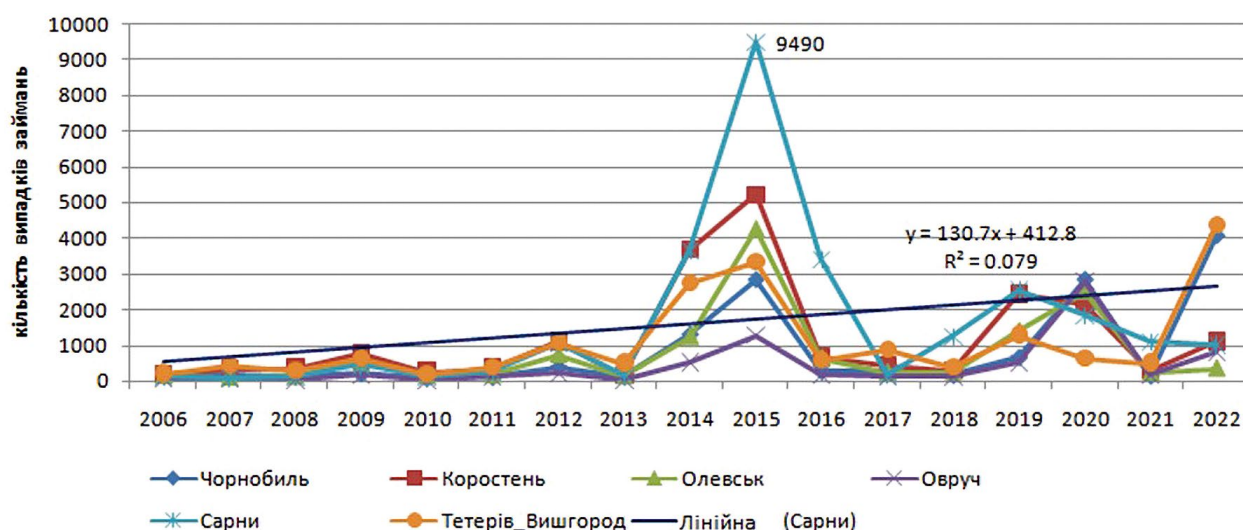


Рис. 3. Динаміка пожеж (кількість точок загорання) по територіях, закріплених за метеостанціями, у період 2006–2022 рр.

з максимальним числом точок загорань, на території яких максимальний відсоток пожеж (92 та 60 % відповідно) припадає на агроландшафт — територію сільгоспвиробництва. Окремо було розглянуто випадки локальних лісових пожеж у квітні 2020 р. по території Житомирської області (Лугинський та Овруцький райони). За період 2021–2023 рр. максимальна кількість пожеж припадала на регіони міст Чорнобиля та Тетерева, що пов'язано з військовими діями на цих територіях.

Найбільша кількість випадків спалахів характерна для тих регіонів, у яких переважають площі з агроландшафтами. За 2011–2015 рр. на території метеостанції м. Коростень загалом було відмічено 10 484 випадків спалахів, зокрема в агроландшафті — 92 % випадків;

відповідно по регіону м. Сарни із 14 678 спалахів в агроландшафті — 60 %. Для всієї території дослідження частка спалахів в агроландшафтах у середньому становить до 67 % від загальної кількості випадків за 2006–2023 рр.

Динаміка річних даних щодо кількості пожеж за період 2006–2022 рр. представлена на рис. 3, яка показує зростання пожеж з 2013 р., виділяючи періоди 2015, 2019, 2020 та 2022 рр. із максимальною кількістю пожеж.

Динаміка кількості діб з пожежами, наведена на рис. 4, показує, що за кількістю діб з пожежами виділяються регіони з метеостанціями міст Коростень, Тетерів та Чорнобиль з максимумами за 2009, 2012, 2015, 2019, 2021 та 2022 рр. Максимальна річна кількість пожеж зафіксована для м. Коростень: 2015 р. — 167 діб,

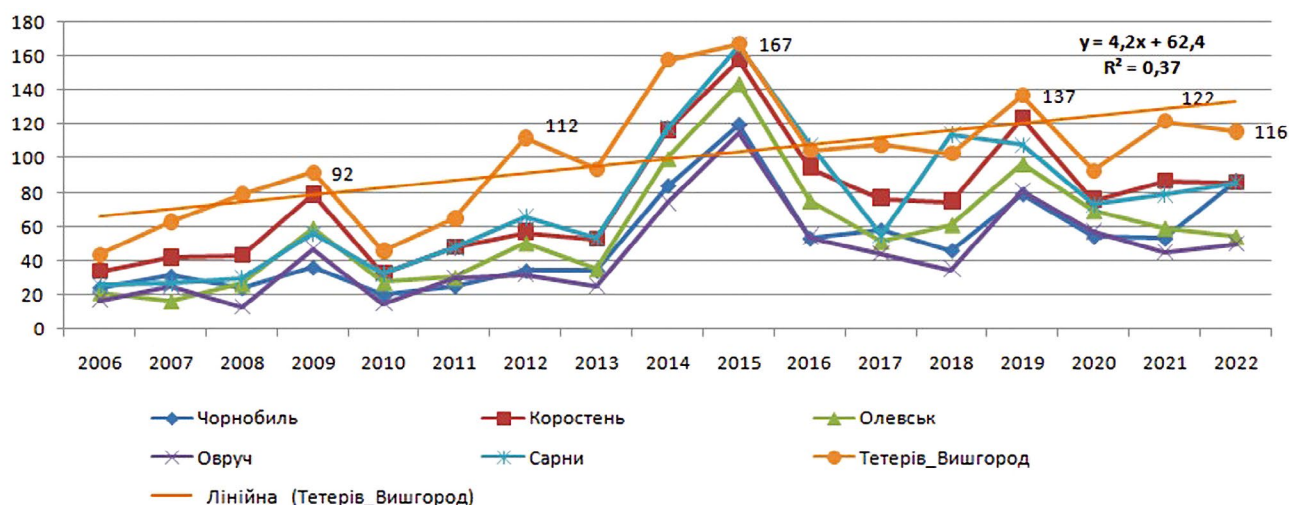


Рис. 4. Динаміка тривалості пожеж за територіями, закріпленими за метеостанціями, у період 2006–2022 рр.

2019 р. — 137, 2021 р. — 122 та 2022 р. — 116 діб. Апроксимація кривої ходу річної кількості діб із пожежами лінійним трендом демонструє збільшення тривалості періодів із пожежами в регіонах метеостанцій (рис. 4) кожні 10 років на 50–60 діб. Це підтверджує дослідження та результати робіт [1–3].

Проведено оцінку статистичної значущості⁴ характеристик лісових пожеж (середні дані за дату та місяць) за обраними територіями (віднесеними до метеостанцій — м. Чорнобиль, м. Коростень, м. Сарни) з використанням програмного комплексу Real Statistics⁵ і представленою такими параметрами:

t -критерій Стюдента — t -stat (визначення статистичної значущості відмінностей середніх величин);

ефект Коена (Cohen d) — розмір ефекту (величина впливу);

показник значущості p (p -value) — статистично значуща різниця між середніми для двох груп.

Статистична значимість у нашому випадку — це ймовірність того, що різниця між двома наборами даних про кількість загорань для просторово неоднорідної території обумовлена реальною відмінністю варіантів, що тестуються, та не є випадковою. Якщо результат статистично значущий, це означає, що його отримання внаслідок випадкових подій чи флуктуацій є малоімовірним.

Інструмент аналізу даних реальної статистики (Real Statistics)⁶ поєднує аналіз рівних та нерівних

дисперсій, надає довірчі інтервали та розмір ефекту Коена. Також надається друга міра величини ефекту, що заснована на коефіцієнті кореляції.

В аналізі використовувалися дані для регіонів м. Чорнобиль — м. Коростень та м. Коростень — м. Сарни за період 2006–2010 рр. за датами пожеж та середньомісячні дані за період 2011–2016 рр.

Дані обробки (тестування — t -test) з використанням t -критерію Стюдента, ефекту Коена та показника значущості p (p -value) наведені в табл. 3.

Оскільки для обох пар даних розраховане значення t -критерію Стюдента (t -stat = 3,07 та 3,09) більше за критичне (t -crit = 1,65 якщо рівень значущості $\alpha = 0,05$ та ступені свободи $df = 362$ та 373) та ймовірність помилково відхилити нульову гіпотезу про рівність середніх менша за 0,05 (p -value = 0,0011 < 0,05), то робимо висновок про статистичну значущість відмінностей між порівнюваними величинами — кількостями точок загорання за добу для регіонів м. Чорнобиль — м. Коростень і м. Коростень — м. Сарни з ймовірністю помилки 5 %. Параметр Cohen $d = 0,288$ вказує на те, що величина відмінностей середніх значень двох наборів даних невелика і дорівнює 0,288 стандартного відхилення. Причиною того, що регіон м. Коростень вирізняється за середньодобовою кількістю загорання, може бути переважання агроландшафту (85 % території) на відміну від інших регіонів (див. табл. 1).

Таблиця 3. Оцінка статистичної значущості параметра «число загорань» за даними для різних регіонів в умовах нерівних дисперсіях та ймовірності помилки 5%

Статистика	Регіон метеостанції			
	Чорнобиль	Коростень	Коростень	Сарни
Кількість днів із займаннями	135	231	231	172
Середня кількість займань за добу	5,0	8,4	8,4	5,0
Стандартне відхилення	46,604	153,456	153,456	47,266
Спільне стандартне відхилення	114,1206		108,1733	
Ефект Коена (Cohen d)	0,288		0,287	
Показник значущості (p -value)	0,00114		0,00107	
Кількість ступенів свободи (df)	362		373	
t -критерій Стюдента (t -stat)	3,07		3,09	
Критичне значення (t -crit), при $\alpha = 0,05$	1,65		1,65	

⁴ Статистична значущість — це ймовірність того, що різниця між двома наборами числових даних обумовлена реальною відмінністю варіантів, що тестуються, і не є випадковою.

⁵ Інструмент аналізу даних реальної статистики (Real Statistics Data Analysis Tool).

⁶ <https://real-statistics.com>.

Таблиця 4. Оцінка статистичної значущості середньомісячних значень параметра «кількість загорань» для різних регіонів з імовірністю помилки $\leq 5\%$

Статистика	Регіон метеостанції			
	Чорнобиль	Коростень	Чорнобиль	Сарни
Кількість місяців	41	48	41	46
Середня кількість займань за місяць	117	218	117	319
Стандартне відхилення	245,832	505,849	245,832	802,393
Спільне стандартне відхилення	407,457		607,697	
Ефект Коена (Cohen d)	0,24956		0,33295	
Показник значущості (p -value)	0,1109		0,10954	
Кількість ступенів свободи (df)	70		54	
t -критерія Стюдента (t -stat)	1,23		1,62	
Критичне значення (t -crit), при $\alpha = 0,05$ (імовірність помилки 5%)	1,66		2,00	

Для випадків (період 2011–2015 рр.) із середньомісячними даними по регіонах м. Чорнобиль — м. Коростень та м. Чорнобиль — м. Сарни результати можна вважати значимими, але з імовірністю помилки близько 11 %. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

Для двох пар даних t -stat < t -crit, p -value = 0,11 > 0,05, т. ч. застосовування p -значення та критичного значення призводить до одного й того ж висновку: в період 2011–2015 рр. з імовірністю 89 % між регіонами немає відмінностей у середньомісячній кількості загорання. Ефект Коена, що дорівнює Cohen d = 0,25 для східного та центрального регіонів, збільшується до Cohen d = 0,33 для найбільш віддалених один від одного регіонів м. Чорнобиль – м. Сарни.

Характеристики лісових пожеж — потужність випромінювання вогню (Frp) в мегаватах і температура яскравості вогняного пікселя (Brightness) у кельвінах не є статистично значимими, оскільки значення t -stat < t -crit та p -value > 0,05.

Проаналізуємо випадки з максимальним числом загорань територією агроландшафту (трав'яні пожежі) та екстремальні випадки лісових пожеж із максимальним поширенням територією.

Аналіз екстремальних випадків із максимальним числом загорань

Розглянемо випадки з максимальною кількістю загорань (трав'яна пожежа), що наведені в табл. 5 для метеостанції м. Коростень (період з 4 по 12 березня 2015 р.), у табл. 6 для метеостанції м. Сарни (період з 24 серпня по 2 вересня 2015 р.) та ситуації максимального поширення лісової пожежі.

Пожежа в агроландшафті. У період з 4 по 12 березня 2015 р. сталася велика за площею пожежа в регіоні метеостанції Коростень (див. табл. 5, рис. 5).

Для виявлення впливу метеорологічних параметрів на розповсюдження пожежі було розглянуто: 1) просторовий розподіл точок загорання з використанням супутникових даних MODIS TERRA (див. рис. 5, а), топографічної карти (див. рис. 5, б), карти типів підстильної поверхні з нанесенням точок загорання за потужністю випромінювання (див. рис. 5, в); 2) з аналізом синоптичної ситуації та оцінкою динаміки метеорологічних параметрів (рис. 6, табл. 6).

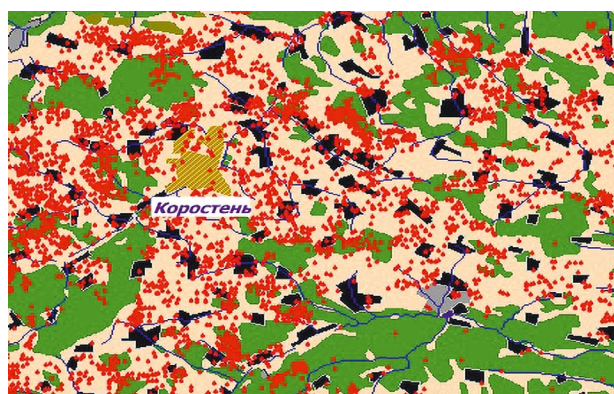
Таблиця 5. Випадок з максимальною кількістю загорань за період з 4 по 12 березня 2015 р. (9 днів) для території метеостанції м. Коростень

Рік	Місяць	День	Кількість пожеж	AvgBright	AvgFrp
2015	3	04	32	331,72	9,08406
2015	3	05	11	339,242	6,33636
2015	3	06	3	310,267	16,6667
2015	3	07	68	329,33	11,1038
2015	3	08	79	330,082	7,73494
2015	3	09	1072	330,703	9,74964
2015	3	10	548	327,709	13,6711
2015	3	11	43	325,912	7,24605
2015	3	12	85	331,818	12,2772

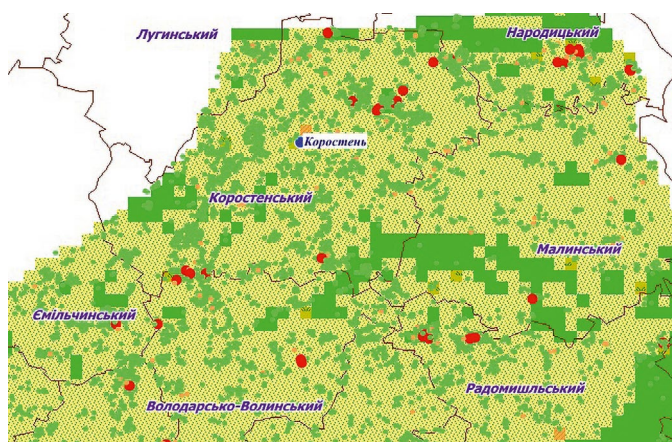
Примітка. AvgBright — середня протягом місяця температура яскравості вогню пікселя вимірюється в кельвінах, AvgFrp — середня за місяць потужність випромінювання вогню в мегаватах.



а



б



в

Розподіл точок займання за потужністю випромінювання вогню в МВт (09-10.03.2015)

● 100 - 502 (0.77%)

● 50 - 100 (2.3%)

● 0 - 50 (97%)

Типи підстильної поверхні

■ Агrolандшафт

■ Водойми_Озера

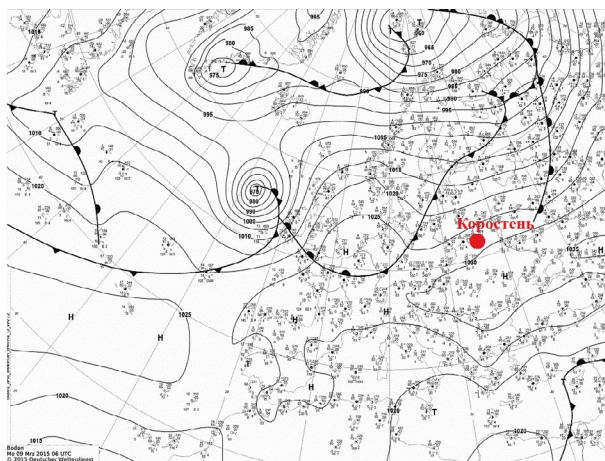
■ Міська забудова

■ Ліс

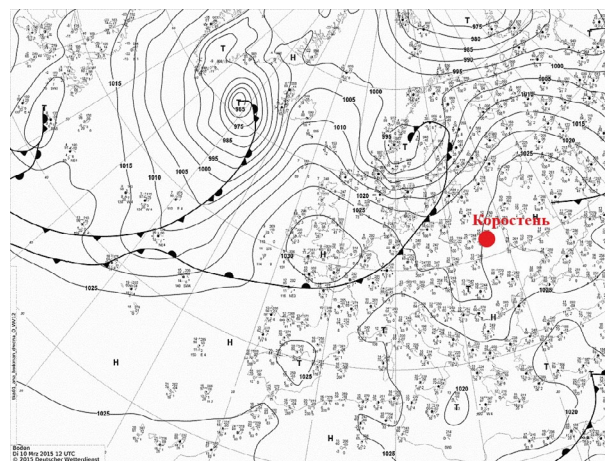
■ Луки та болотна рослинність

г

Рис. 5. Аналіз даних про поширення пожеж із використанням супутникових даних MODIS TERRA за 9–10 березня 2015 р. району з метеостанцією м. Коростень, з розподілом точок загорання за потужністю випромінювання вогню та типами підстильної поверхні



9 березня 2015 р. 06:00 UTC⁷



10 березня 2015 р. 12:00 UTC

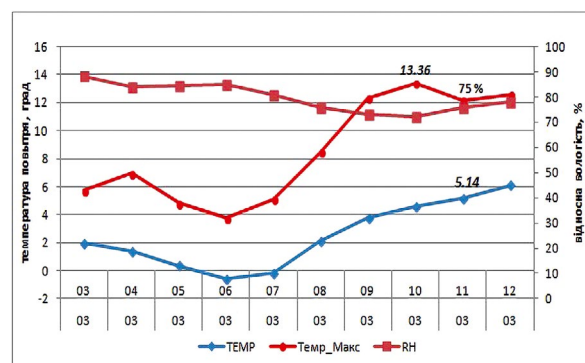
Рис. 6. Приземний аналіз синоптичних умов території Європи 9–10 березня 2015 р.

⁷ UTC — Universal Time Coordinated, міжнародний координований час, що збігається з часом за Гринвічем.

Таблиця 6. Метеорологічні параметри (а) та їхня динаміка (б) за період з 3 до 12 березня 2015 р. по м. Коростень

MONTH	DAY	TEMP	Темп_Макс	RH	RAIN
03	03	1.96	5.71	88.38	5.29
03	04	1.43	6.95	83.94	0.91
03	05	0.37	4.82	84.38	0.38
03	06	-0.54	3.76	84.75	0.25
03	07	-0.20	5.1	80.94	0.01
03	08	2.15	8.47	76.00	0.00
03	09	3.79	12.31	73.12	0.00
03	10	4.57	13.36	72.12	0.00
03	11	5.14	12.15	75.88	0.01
03	12	6.11	12.55	78.06	0.94

а



б

Примітка. Month — місяць, Day — день, TEMP — температура повітря на висоті 2 м, °C, Темп_Макс — максимальна температура, °C, RH — відносна вологість, %, RAIN — добова сума опадів, мм.

Як видно з наведених знімків, основна маса точок займання лежить на території звільнених сільсько-господарських угідь після збирання агропродукції, які розташовані поблизу сільської забудови та з часом заростають травами та чагарником. Займання сталося внаслідок підпалу трав'яного настилу для підготовки полів до переорювання для майбутніх польових робіт, яке далі поширилося на лісовий масив. Таке розташування точок займання вказує на антропогенний характер виникнення пожеж (спалювання сухої трави перед оранням землі). Крім того, величини потужності випромінювання вогню представлені в 97 % невеликими значеннями в межах 0–50 МВт, що вказує на спалах трав'яного покриву [11].

Розглянемо вплив метеорологічних умов та синоптичної ситуації на поширення пожеж територією, вільною від лісових масивів. У табл. 6 наведено основні метеорологічні параметри гідротермічного (температура та вологість) стану атмосфери та динаміки параметрів у період максимальних пожеж.

З табл. 6 видно, що на території м. Коростень з 7 по 9 березня відзначалося різке підвищення приземної температури (на 2 °C за добу для середньодобової та на 3–4 °C для максимальної температури повітря) зі швидкістю вітру близько 3 м/с та падінням відносної вологості з бездощовим періодом протягом тижня. Відповідно до аналізу архіву синоптичних карт приземного тиску [28] така динаміка метеорологічних умов була пов'язана із ситуацією, що склалася над Східною Європою та впливала на територію України, особливо на її північні області (див. рис. 6). Над Північною Атлантикою та архіпелагом Шпіцберген сформувалися потужні циклони, що з півдня були обмежені широкою

розмитою смугою високого тиску без яскраво виражених замкнених центрів. Над Азорськими островами почав зароджуватися антициклон, що рухався на захід у бік Великобританії. Протягом 9–10 березня фактично вся територія України знаходилася під впливом розмитого поля високого тиску та крайньої західної частини баричного гребеня (з ізобарою 1030 гПа). У системі північних циклонів розвинулися теплі та холодні фронти, що рухалися в системі загальної циркуляції із заходу на схід і своїми крайніми відрогами могли

Таблиця 7. Випадок із максимальним числом займань за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. для території метеостанції м. Сарни

Рік	Місяць	День	Кількість пожеж	AvgBright	AvgFrp
2015	8	24	172	325,162	23,0653
2015	8	25	442	328,005	15,3598
2015	8	26	155	320,87	7,24148
2015	8	27	483	315,41	6,41874
2015	8	29	178	319,273	5,78809
2015	8	30	363	321,821	10,5418
2015	8	31	276	319,996	7,38978
2015	9	01	595	328,697	10,1872
2015	9	02	1363	321,682	10,2105
2015	9	03	161	304,05	1,52665

Примітка. AvgBright — середня протягом місяця температура яскравості вогню пікселя вимірюється в кельвінах, AvgFrp — середня за місяць потужність випромінювання вогню в мегаватах.

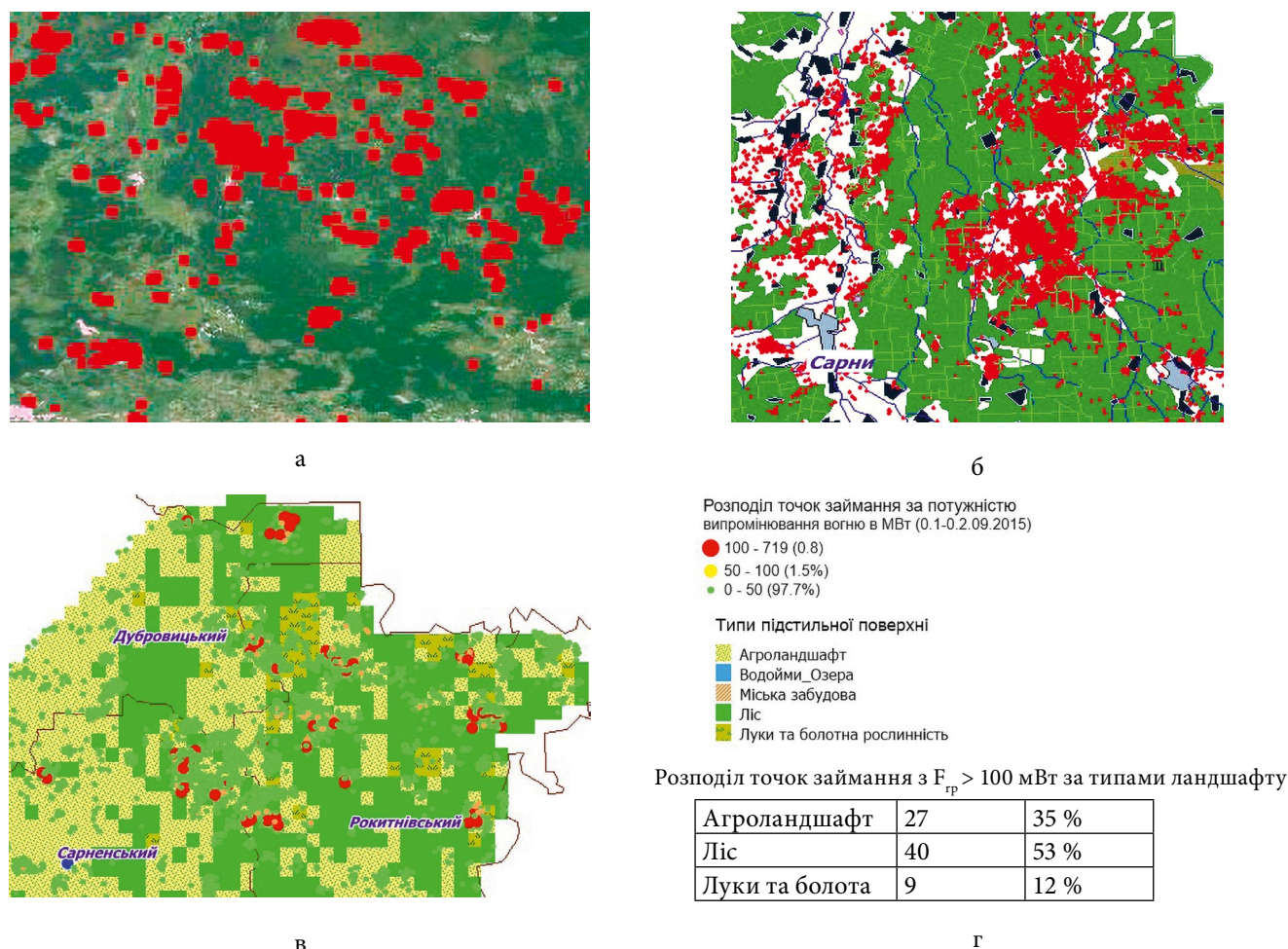


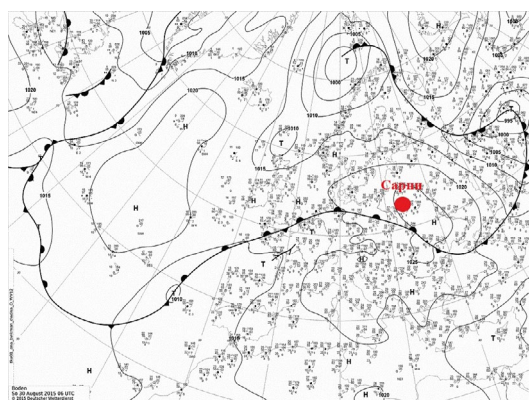
Рис. 7. Зображення, отримане за допомогою приладу супутника MODIS TERRA (а) 1–2 вересня 2015 р. району з метеостанцією м. Сарни, та представлені джерела загорання на топографічній карті (б), на тематичній карті типів підстильної поверхні з розподілом точок загорання за потужністю випромінювання вогню (в) з легендою (г)

чіпляти північні регіони України. Фактично протягом 9–10 березня північ України знаходилася під впливом малоградієнтного поля високого тиску (зі значеннями 1025–1030 гПа), що вплинуло на встановлення стійкої сухої та малохмарної погоди з переважанням теплої повітряної маси, що знаходилася в теплому секторі циклону з центром над Скандинавією. Фактично були сформовані умови, що могли сприяти високому рівню пожежонебезпеки, оскільки стійка малохмарна погода з відсутністю вологи і порівняно високими температурами могла сприяти поширенню чи виникненню пожеж.

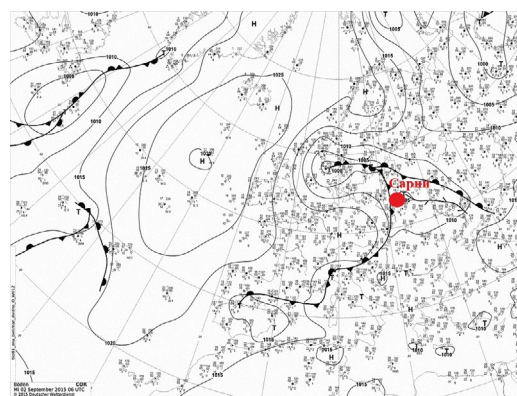
Лісова пожежа 2015 р. Розглянемо випадок (з 1 по 2 вересня) з екстремальною кількістю точок загорання територією метеостанції м. Сарни в період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. з описом динаміки метеорологічних умов (табл. 7), просторового розподілу точок загорання (рис. 7), синоптичної ситуації (рис. 8), які вплинули на поширення пожеж.

За супутниковими даними [23] 53 % осередків займання з потужністю випромінювання вогню понад 100 МВт (позначено червоними точками) зафіксовано на вкритих лісовою рослинністю територіях (див. рис. 7). Представлені метеорологічні характеристики та їхня динаміка (табл. 8) у зазначений період показують зростання температури як максимальної (з 27 до 36 °C), так і середньодобової (з 21 до 27 °C) при зниженні відносної вологості з 51 до 37 %. У таких «сухих та жарких» умовах за відсутності опадів та середньої швидкості вітру 2–3 м/с відбувається збільшення кількості загорань по території м. Сарни 1–2 вересня 2015 р. Слід зазначити, що річна сума опадів з 2014 р. до 2015 р. зменшилася з 522 до 369 мм/рік, що відповідає мінімуму за 40-річний період 1981–2019 рр.

Погодні умови в регіоні м. Сарни з 30 серпня по 3 вересня 2015 р. визначалися поточною синоптичною ситуацією, що склалася над Європою. Над територією



а



б

Рис. 8. Приземні карти погоди Європі за 06:00 UTC30 серпня 2015 р. (а); за 06:00 UTC2 вересня 2015 р. (б) [28]

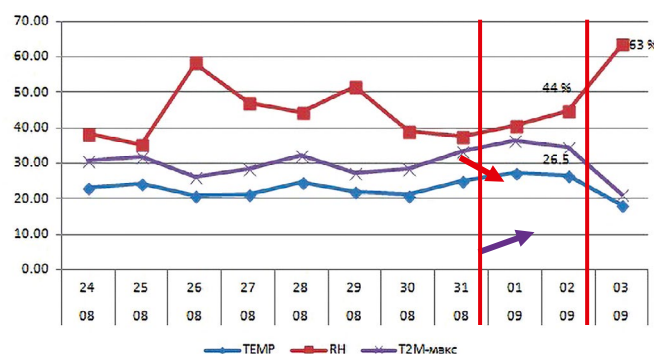
Україні це було розмите поле високого тиску з окремими замкнутими ізобарами (1020 гПа), що розділяло циклони з центрами над Данією, півднем Скандинавського півострова, північно-західними регіонами РФ та розмитою областю низького тиску над Туреччиною в кінці серпня, що змінилося полем низького тиску тилової частини циклону. До 30 серпня Україна знаходилася в тилівій частині циклону. Тоді над Центральною та Східною Європою почала формуватися замкнена ізобара з тиском 1020 гПа. Це зумовило стійку ясну малохмарну погоду над північними територіями України. З 31 серпня по 1 вересня територією України з південного-заходу на північний-схід пройшов теплий фронт; 2 вересня північні території України знаходилися в теплому секторі циклону, атмосферний тиск знизився (1010 гПа), але поле все ще було розмите. За теплим фронтом встановилася хмарна тепла

погода. Уже 3 вересня через північно-західні області України пройшов холодний фронт з притаманною йому погодою зі зливовими опадами.

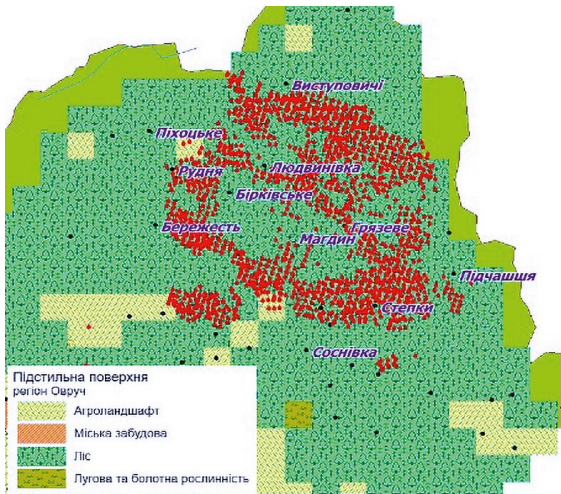
Великомасштабна лісова пожежа. На прикладі великомасштабної пожежі у Житомирській області за період з 15 по 20 квітня 2020 р. розглянемо випадок впливу швидкості вітру спільно з гідротермічними характеристиками повітря (температурою та вологістю) на поширення лісових пожеж [29–31]. Загалом пожежа знищила близько 4000 га лісу. На території шести лісництв Овруцького району масштабні лісові пожежі, що почалися 16 квітня, знищили та пошкодили 43 нежитлові та 38 житлові будинки, найбільших збитків завдано селам Нижня Рудня, Острови, Магдін та Лічмани [30–31]. Просторове поширення пожеж у лісових масивах територією Овруцького та Лугинського районів показано на карті типів підстильної поверхні (рис. 9).

Таблиця 8. Метеорологічні параметри та їхня динаміка за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р. на території метеостанції м. Сарни

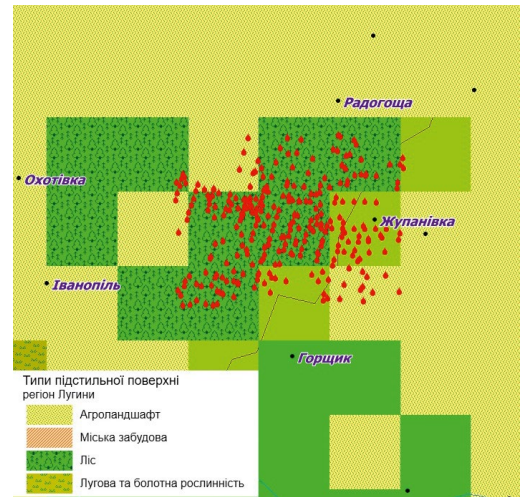
MONTH	DAY	TEMP	T2M-макс	RH	RAIN
08	24	23.03	30.65	38.31	0.00
08	25	24.31	31.96	35.44	0.00
08	26	20.94	26.14	58.25	0.94
08	27	21.40	28.51	47.00	0.00
08	28	24.76	32.4	44.38	0.00
08	29	21.98	27.48	51.75	0.03
08	30	21.05	28.59	38.94	0.00
08	31	25.17	33.33	37.38	0.01
09	01	27.19	36.37	40.50	0.00
09	02	26.52	34.62	44.81	0.01
09	03	18.23	21.13	63.56	0.76



Примітка. Month — місяць, Day — день, TEMP — температура повітря на висоті 2 м, °C, Temp_Макс — максимальна температура, °C, RH — відносна вологість, %, RAIN — добова сума опадів, мм.

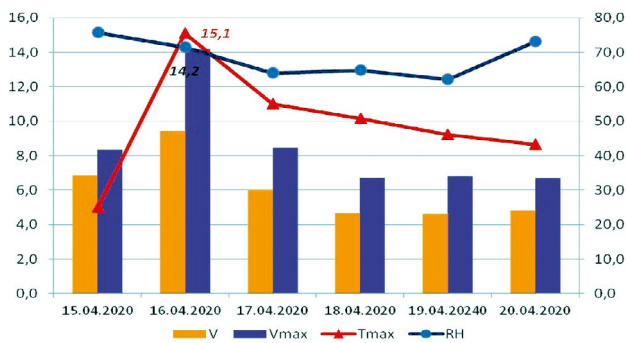


а

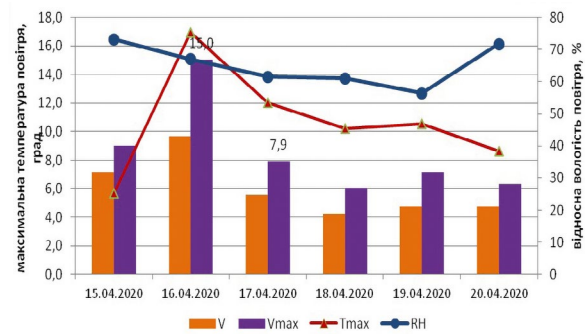


б

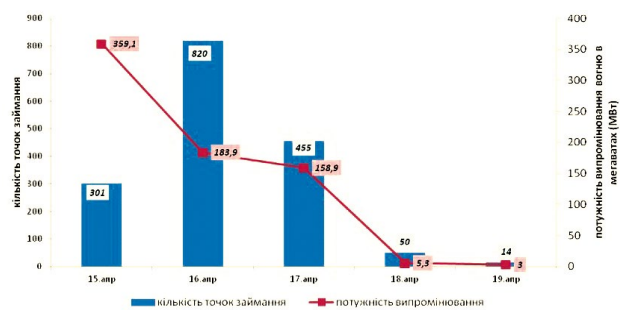
Рис. 9. Просторовий розподіл лісових пожеж у районі с. Людвинівка Овруцького району (а) та с. Радогоща Лугинського району (б) Житомирської області за період 15–20 квітня 2020 р.



а

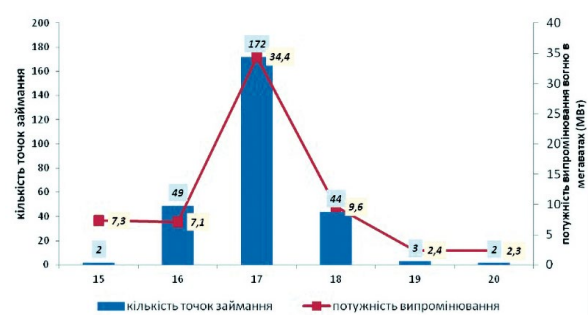


б



б

с. Людвинівка



г

с. Радогоща

Рис. 10. Динаміка метеорологічних параметрів біля земної поверхні (V — швидкість вітру, м/с; Vmax — максимальна швидкість вітру, м/с; Tmax — максимальна температура повітря, °C; RH — відносна вологість повітря, %) та характеристики пожеж (кількість точок загорання, потужності випромінювання вогню, МВт) біля с. Людвинівка Овруцького району (а, б) та с. Радогоща Лугинського району (в, г) 15–20 квітня 2020 р.

У районі с. Людвинівка загальна кількість точок займання становила 1640 на території близько 300 км² з максимумом 16 квітня — 820 точок. При цьому максимальна потужність випромінювання пожежі (359 МВт) спостерігалася 15 квітня за меншої території загорання та знизилася до 184 МВт зі збільшенням площі горіння (рис. 10, б). У Лугинському районі, біля с. Радогощі на площі близько 40 км² у цей період максимум горіння спостерігався 17 квітня (272 точки загорання) з потужністю випромінювання від місць горіння 34,4 МВт з різким зниженням наступного дня до 9,6 МВт (див. рис. 10, г). Додатково до характеристик пожеж (кількість точок займання та потужність випромінювання вогню) у цей період було розглянуто динаміку ходу метеорологічних параметрів (швидкості вітру, температури та вологості повітря), що наведені на рис. 10 для с. Людвинівка та с. Радогоща.

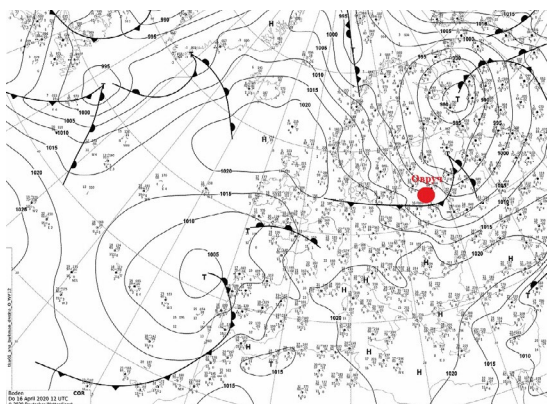
Представлені результати показують, що збільшення кількості точок займання супроводжувалося збільшенням швидкості вітру, підвищенням температури повітря та збільшенням сухості атмосферного повітря. Показано, що в період пожеж з 16 по 17 квітня 2020 р. спостерігалися найбільш сприятливі умови для поширення пожеж: максимальні швидкості вітру досягали 14–15 м/с, максимальна температура для квітня піднялася до 15 °С за відносної вологості повітря 60–65 %. Такі умови визначалися відповідною синоптичною ситуацією. До 16 квітня вся територія України перебувала в області малоградієнтного поля підвищеного тиску. На погодні умови з 16 квітня починає впливати глибокий циклон, що зсунувся із заходу в район Кольського півострова. Північні області країни знаходяться у вузькому теплому секторі відрога північно-західного циклону (рис. 11, а), що

зумовило різке потепління. Наближення та проходження протягом дня сухого холодного фронту спричинило великі швидкості вітру. Надвечір 16 квітня північні області України були за холодним фронтом. З 17 квітня (див. рис. 11, б) над усією територією України формується розмите поле підвищеного тиску між антициклоном над Скандинавією і циклоном, що заповнюється, з центром на північному сході європейської території РФ. Установлюється прохолодна малохмарна погода.

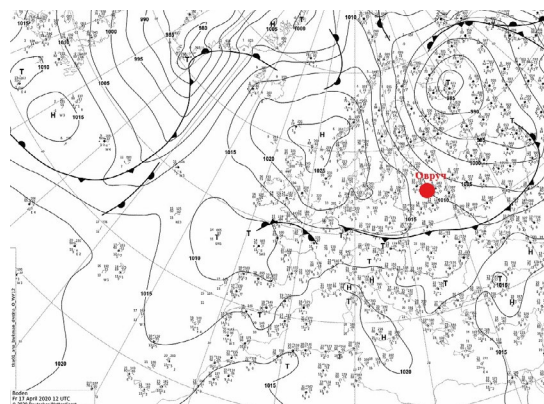
Для розглянутих випадків із максимальною площею займання на території метеостанції м. Коростень та м. Сарни проведемо порівняльний аналіз погодних показників пожежної небезпеки, розрахованих різними методами та моделями.

Показники пожежної небезпеки для розглянутих екстремальних пожеж

Оцінка пожежної небезпеки — це система, яка відображає вплив існуючих чи очікуваних значень факторів пожежної небезпеки (погодних та природних умов) у вигляді одного чи більше числових індексів, які є критеріями необхідності захисту території від пожежі. Розглянуті випадки з максимальною кількістю точок загорання були оцінені із застосуванням різних способів розрахунку показника пожежної небезпеки за погодними параметрами: FWI — метеорологічний індекс, реалізований у Глобальній моделі прогнозування пожеж ЕЦСПП (GEFF), що враховує вплив вологості палива та погодних умов на поведінку пожежі [12–14, 18]; PPO — комплексний показник пожежної небезпеки В.Г. Нестерова [15–16], який враховує метеорологічні елементи, що впливають на зміну вологості лісових



а



б

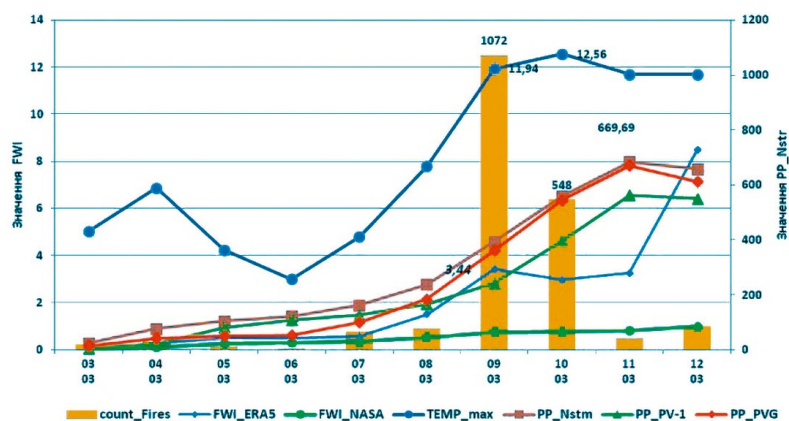
Рис. 11. Приземні карти погоди в Європі за 12:00 UTC 16 квітня 2020 р. (а), за 12:00 UTC 17 квітня 2020 р. (б)

горючих матеріалів. У наборі даних щоденних значень показники FWI були змодельовані з використанням моделі GFS (Global Forecast System — глобальна погодна модель) для оцінки пожежної небезпеки в майбутніх кліматичних сценаріях.

Для розглянутих випадків із максимальними пожежами проаналізовано динаміку поведінки погодних показників пожежної небезпеки: індексу FWI, що був розрахований за трьома кліматичними моделями [19–21], даних реаналізу ERA5 [17], за даними NASA [22]; показника В.Г. Нестерова PPO та його модифікацій [32–33] з урахуванням вологості надґрунтового покриву, з диференційованими поправками на опади за даними NASA.

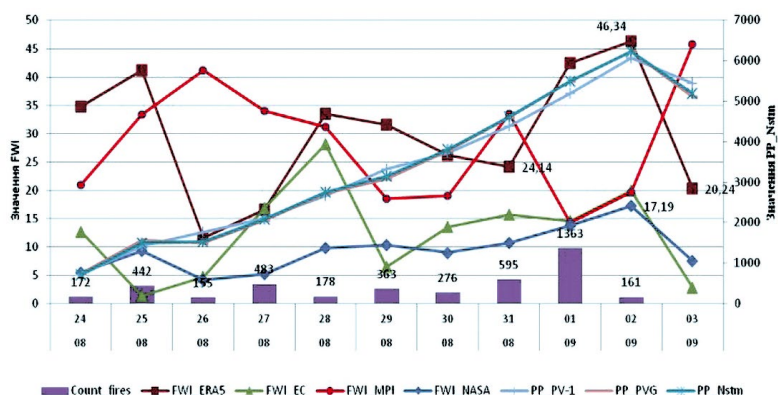
Для розрахунку індексу FWI та показника PPO використовувалися полуденні значення температури повітря, температури точки роси, відносної вологості, швидкості вітру та накопичених за 24 год опадів за поточними даними NASA [34] та спрогнозованими даними за кліматичними моделями [19]. Використовувалась авторська програма розрахунку індексу FWI та показника PPO за поточними даними NASA [14, 32]. Подана динаміка параметрів для двох ситуацій по територіях м. Коростень та м. Сарни на рис. 12 показує:

для весняного сезону (м. Коростень) значення FWI за використовуваними трьома кліматичними моделями дорівнюють постійній величині, рівній 1,0



День	FWI_ERA5	FWI_NASA
3	0,05	0,02
4	0,29	0,11
5	0,50	0,27
6	0,52	0,30
7	0,58	0,36
8	1,52	0,53
9	3,44	0,75
10	2,96	0,77
11	3,27	0,82
12	8,51	0,99

а



День	FWI_ERA5	FWI_NASA	FWI_EC	FWI_MPI
24	34,79	5,43	12,68	20,99
25	41,14	9,29	1,36	33,36
26	11,58	4,15	4,62	41,12
27	16,57	5,17	16,83	34,05
28	33,53	9,75	28,10	31,20
29	31,57	10,34	6,47	18,53
30	26,17	8,97	13,48	19,00
31	24,14	10,72	15,70	33,45
01	42,42	13,81	14,59	14,26
02	46,34	17,19	19,90	19,67
03	20,24	7,46	2,77	45,74

б

Count_fires — кількість точок загорання; FWI_ERA5 — за даними реаналізу ERA5; FWI_NASA — за поточними даними NASA; FWI_MPI — за даними кліматичної моделі Німеччини MPI-M-MPI-ESM-LR/MPI-CSC-REMO2009; FWI EC — за даними кліматичної моделі МОНС-HadGEM2-ES/MONC-HadGEM3-GA7; Temp_max — максимум температури повітря; PP Nstm — PPO В.Г. Нестерова. PV-1 — PPO з урахуванням поправок на опади; PP PVG — PPO з урахуванням гігроскопічності горючих лісоматеріалів.

Рис. 12. Динаміка індексів пожежної небезпеки (FWI, PPO) та кількість точок загорання: а — на території м. Коростень за період з 3 по 12 березня 2015 р.; б — на території м. Сарни за період з 24 серпня по 3 вересня 2015 р.

(у моделях закладено початок пожежонебезпечного періоду з квітня);

за архівними даними Reanalysis ERA5 і NASA значення різняться в кілька разів і практично не відповідають дням із максимальною кількістю точок займання (рис. 12, а);

значення показників PPO Нестерова повільно зростають відповідно до перебігу температури, але максимуми значень спостерігаються через 1–2 доби після періоду з максимальною кількістю загорання (рис. 12, а);

для літнього періоду (м. Сарни) у період пожеж динаміка значень FWI за кліматичними моделями при щоденних розрахунках не показує певного тренду, максимуми значень спостерігаються через день після пожеж як для значень FWI, так і для значень PPO (рис. 12, б);

значення FWI за архівними даними (ERA5, NASA) відрізняються одне від одного вдвічі (різні категорії пожежної небезпеки — FWI ERA5 — «дуже високий», FWI NASA — «помірний»), але в середньому відповідають динаміці пожеж із відставанням на 1 добу. Як показано в таблиці (див. рис. 12, б), виділяються два критичні дні з максимумом значень FWI за архівними даними ERA5, NASA, що відрізняється від значень, отриманих за прогностичними моделями (FWI EC, FWI MPI);

значення показника PPO В. Г. Нестерова та його модифікацій у періоди максимальних пожеж не відрізнялися за величиною (високий рівень пожежної небезпеки) та лінійно відповідно до температури повітря у 15 °C зростали до 3 вересня 2015 р., а потім, зі зниженням температури на 10 °C та підвищенням вологості на 20 %, усі значення кліматичних показників різко зменшилися і пожежі припинилися.

Для розглянутих випадків пожеж у с. Людвинівка та с. Радогоща у квітні 2020 р. були розраховані модифіковані показники PPO Нестерова, які за значеннями PPO (від 400 до 1000) належать до низького рівня пожежної небезпеки. Зростання показників PPO спостерігалось з 16 по 19 квітня, а максимум місць займання відзначалося 16, 17, 18 квітня. Тому за значеннями PPO період з 16 по 19 квітня можна віднести до періоду з низьким рівнем пожежної небезпеки.

Таким чином, показники пожежної небезпеки за метеорологічними параметрами (модифіковані варіанти показника PPO В. Г. Нестерова) найбільш адекватно описують динаміку пожежної небезпеки за архівними та поточними даними (ERA5, NASA)

у періоди максимальних пожеж з максимумом протягом двох діб.

Висновки

За обробленими даними про пожежі за період 2006–2022 рр. по території Українського Полісся річна кількість пожеж збільшилась у три рази, а площі загорання у 12 разів, досягаючи в окремі роки від 800 км² у м. Коростень (2014 р., 2020 р.) до 2200 км² у м. Сарни (2015 р.). Зазначено збільшення кількості днів з пожежами кожні 10 років на 50–60 діб для території обраних регіонів метеостанцій. Найбільша кількість займань характерна для регіонів, у яких переважають площі з агроландшафтами. Для всієї території дослідження частка займань в агроландшафтах у середньому становить до 67 % від загальної кількості випадків за 2006–2022 рр.

Проведена оцінка статистичної значущості відмінностей у середньодобовій та в середньомісячній кількості займань на територіях окремих регіонів показує просторові відмінності розглянутих характеристик пожеж. Причиною того, що регіон м. Коростень вирізняється за середньодобовою кількістю займань, може бути переважання агроландшафту (від 86 до 93 % території в різні роки) на відміну від інших регіонів (див. табл. 2).

У роботі було розглянуто випадки періодів з максимальною кількістю точок загорання в період пожеж та проведено аналіз метеорологічних умов та синоптичних ситуацій для регіонів, що розглядаються. Отримані результати демонструють вплив погодних умов на характер та територіальне поширення точок займання. Відзначається вплив великомасштабних факторів (малоградієнтне баричне поле антициклонічного типу або проходження холодного фронту з підвищеними швидкостями вітру) та місцевих локальних умов (тип регіонального землекористування) на рівень пожежної небезпеки території регіону.

Оскільки періоди та території пожеж невеликі, розглядати та робити оцінку пожежної небезпеки з використанням даних глобальних моделей недоцільно. Прогнозовані за кліматичними моделями CORDEX дані FWI можна розглядати як середньомісячні або сезонні прогнози для оцінки тренду показника пожежної небезпеки на майбутнє на наступні 3–5 років. Оцінка пожежної небезпеки з використанням показника PPO вимагає додаткових досліджень на більш широкому матеріалі з проведенням статистичного аналізу всіх використовуваних чинників.

Список використаної літератури

- Wildfires under climate change. A burning issue / A. Dowdy, L. Purcell, S. Boulter, L. C. Moura. – Report. UN environment programme frontiers, 2022. – Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38061/Frontiers_2022CH2.pdf.
- Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013 / W. M. Jolly, M. A. Cochrane, P. H. Freeborn, Z. A. Holden [et al.] // *Nature Communications*. – 2015. – Vol. 6. – Art. 7537. – doi.org/10.1038/ncomms8537.
- Ukraine Forest Fire Report 2010 // *International Forest Fire News (IFFN)*. – 2010. – No. 40 (July–December). – P. 61–75.
- Ходаков В. Е. Лесные пожары: методы исследования: монография / В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 470 с.
- Ковриго В. П. Почвоведение с основами геологии / В. П. Ковриго, И. С. Кауричев, Л. М. Бурлакова. – Москва : Колос, 2000. – 416 с.
- Швиденко А. З. Уразливість лісів України до зміни клімату: монографія / А. З. Швиденко, І. Ф. Букша, С. В. Краковська. – Київ : Ніка-Центр, 2018. – 184 с.
- Гончаренко Л. Как изменение климата отразится на украинских лесах. – Режим доступа: <https://ecopolitic.com.ua/news/kak-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-ukrainskih-lesah>.
- Kasischke E. S. Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska / E. S. Kasischke, M. R. Turetsky // *Geophysical Research Letters*. – 2006. – Vol. 33. – L09703. – doi.org/10.1029/2006GL025677.
- Stocks B. J. Large forest fires in Canada, 1959–1997 / B. J. Stocks [et al.] // *J. Geophys. Res.* – 2002. – Vol. 108 (D1). – P. 8149. – doi.org/10.1029/2001JD000484.
- Rigo D. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty / D. Rigo, G. Libertà, T. Houston Durrant [et al.]. – Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017. – doi.org/10.2760/13180, JRC108974.
- Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування / А. В. Орещенко, В. І. Осадчий, М. В. Савенець, В. О. Балабух // *Вісник НАН України*. – 2020. – № 11. – С. 33–44. – doi.org/10.15407/vsn2020.11.033.
- Van Wagner C. E. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Technical Report 35/ C. E. Van Wagner // Ottawa, Ont., Can. : Canadian Forest Service, 1987.
- European Fire Danger Application: Product User Guide. – Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2. climate.copernicus.eu.
- Van Wagner C. E. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Technical Report 33/ C. E. Van Wagner, T. L. Pickett // Ottawa, Ont., Can. : Canadian Forest Service. – 1985.
- Нестеров В. Г. Использование температуры точки росы при расчете показателя горимости леса / В. Г. Нестеров, М. В. Гриценко, Т. А. Шабунина // *Метеорология и гидрология*. – 1968. – № 9. – С. 102–104.
- Софронов М. А. Оценка пожарной опасности по условиям погоды с использованием метеопрогнозов / М. А. Софронов, Т. М. Софронова, А. В. Волокитина // *Лесное хозяйство*. – 2004. – № 6. – С. 31–32. – Режим доступа: http://forest.akadem.ru/Articles/04/sofronov_1.pdf.
- ERA5-based global meteorological wildfire danger maps / C. Vitolo, F. Di Giuseppe, C. Barnard [et al.] // *Sci. Data*. – 2020. – Vol. 7. – P. 216. – <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z>.
- Lawson B. D. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System / B. D. Lawson, O. B. Armitage // Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre. – Edmonton, AB, 2008. – 84 p.
- Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store: Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projection. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). – 2020. – doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
- CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4 // Report meteorology and climatology. – 2014. – No. 116.
- Bukovsky M. S. Regional climate change projections from NA-CORDEX and their relation to climate sensitivity / M. S. Bukovsky, L. O. Mearns // *Climatic Change*. – 2020. – Vol. 162. – P. 645–665. – doi.org/10.1007/s10584-020-02835-x.
- The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications: Version 2 (MERRA-2) / Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J [et al.] // *J. Climate*. – 2017. – Vol. 30 (14). – P. 5419–5454. – doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.
- Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Product Title: MODIS / Aqua+Terra Thermal Anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data). – doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
- Giglio L. The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire product / L. Giglio, W. Schroeder, C. O. Justice // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 178. – P. 31–41.
- Lazarev M. M. Justification of the possibility of the fuel wood usage from the northern areas of Polissya / M. M. Lazarev,

- L. M. Otreshko, O. V. Kosarchuk [et al.] // Problems of Chornobyl Exclusion Zone. – 2018. – Vol. 19. – P. 46–57.
26. Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України (ОСПУ-2005). – Київ, 2005.
27. Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chornobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district / I. Labunska, S. Levchuk, V. Kashparov [et al.] // Environment International. – 2021. – Vol. 146. – No. 1. – Art. 106282.
28. Deutschen Wetterdienst – DWD. – Available at: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html.
29. Наслідки весняних пожеж у Лугинському лісгоспі. – Режим доступу: <https://epl.org.ua/announces/naslidky-vesnyanyh-pozhezh-u-lugynskomu-lisgospi/>.
30. Лісові пожежі в Житомирській області перекинулися на села, людей евакуюють. – Режим доступу: https://lb.ua/society/2020/04/18/455634_lesnie_pozhari-zhitomirskoy-oblasti.html.
31. У Житомирській області дев'ятий день не можуть погасити лісову пожежу, викликану підпалом сухої трави. – Режим доступу: https://lb.ua/society/2020/04/12/455116_zhitomirskoy-oblast_devyatiy_den.html.
32. Глаголев В. А. Алгоритм краткосрочного прогноза / В. А. Глаголев // Региональные проблемы. – 2018. – Т. 21. – № 1. – С. 37–41.
33. Gubenko I. M. Comparative analysis of methods for calculating fire hazard indices / I. M. Gubenko, K. G. Rubinstein // Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. – 2012. – No. 347. – P. 207–222.
34. NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER). – Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.

into account the influence of meteorological factors and local conditions of the area. A statistical analysis of the characteristics of forest fires on the territory of 6 regions, assigned by weather stations, was carried out, based on the processed data (total data for the month, year) on fires for the period from 2006 to 2022. The following was noted: 1) the annual number of fires increased by 3 times, and the burning area by 12 times, reaching in certain years from 825 km² (2014, 2020) to 1,653 km² (2015); 2) the largest number of fires was observed on the territory of the agricultural landscape, in general from 70% to 90% of the area of the region. Over a relatively short period (16 years), the dynamics of the growth of the annual sums of burned areas is noted. Extreme cases with the maximum number of ignition points (from 1,500 to 1,800) with an area of up to 100–120 km² in the territory of the Korosten and Sarny weather stations are described with a detailed analysis of weather conditions. Copernicus data used: three global climate datasets, fire characteristics data and four fire danger indices to analyze the use of fire weather indicators to assess fire danger in extreme cases. The influence of meteorological conditions and the synoptic situation on the spread of fires in the territory free from forest massifs is described using the archive of synoptic maps for the European territory and modern technologies of geoinformation systems. The influence of large-scale natural factors and local conditions on the level of fire danger of the territory of the region under consideration is noted. The results of the executed research and the possibility of using weather indicators of fire danger, obtained using archival data or climate models, will allow improving estimates of secondary radioactive pollution of the environment due to forest fires in the Exclusion Zone.

Keywords: natural fires, fire danger index, statistical analysis of fire characteristics, climate models, satellite information, meteorological situation, radionuclides.

**T. D. Lev, V. M. Piskun, Yu. V. Yatsenko,
I. P. Shedemenko**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysohirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Comprehensive Analysis of Forest Fires Characteristics and Meteorological Conditions Affecting their Spread in the Territory of Ukrainian Forests for the Period 2006–2022

The spatio-temporal characteristics of natural fires on the territory of Ukrainian Polissia were studied, taking

References

1. Dowdy A., Purcell L., Boulter S., Moura L. C. (2022). *Wildfires under climate change. A burning issue. UN environment programme frontiers. Report*. Available at: https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/38061/Frontiers_2022CH2.pdf.
2. Jolly W. M., Cochrane M. A., Freeborn P. H., Holden Z. A., Brown T. J., Williamson G. J., Bowman D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, vol. 6, art. 7537. doi.org/10.1038/ncomms8537.

3. Ukraine Forest Fire Report 2010 (2010). *International Forest Fire News (IFFN)*, vol. 40 (July-December), pp. 61–75.
4. Khodakov V. E., Zharikova M. V. (2011). *Lesnye pozhary: metody issledovaniia* [Forest Fires: Research Methods]. Kherson: Grin D. S., 470 p. (in Rus.)
5. Kovrigo V. P., Kaurichev I. S., Burlakova L. M. (2000). *Pochvovedenie s osnovami geologii* [Soil Science with Basics of Geology]. Moscow: Kolos, 416 p. (in Rus.)
6. Shvydenko A. Z., Buksha I. F., Krakovska S. V. (2018). *Urazlyvist lisiv Ukrainy do zminy klimatu* [Vulnerability of Ukrainian forests to climate change]. Kyiv: Nika-Tsentr, 184 p. (in Ukr.)
7. Goncharenko L. *Kak izmenenie klimata otrazitsia na ukrainskikh lesakh* [How climate change will affect Ukrainian forests]. Available at: <https://ecopolitic.com.ua/news/kak-izmenenie-klimata-otrazitsya-na-ukrainskikh-lesah/Ecopolitic.com.ua>. (in Rus.)
8. Kasischke E. S., Turetsky M. R. (2006). Recent changes in the fire regime across the North American boreal region – Spatial and temporal patterns of burning across Canada and Alaska. *Geophysical Research Letters*, vol. 33, L09703. doi.org/10.1029/2006GL025677.
9. Stocks B. J. [et al.] (2002). Large forest fires in Canada, 1959–1997. *J. Geophys. Res.*, vol. 108(D 1), p. 8149. doi.org/10.1029/2001JD000484.
10. Rigo D., Libertà G., Houston Durrant T., Artés Vivancos T., San-Miguel-Ayán J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi.org/10.2760/13180, JRC 108974.
11. Oreshchenko A. V., Osadchyi V. I., Savenets M. V., Balabukh V. O. (2020). Vyivlennia i monitorynh potentsiino nebezpechnykh pozhezh na terytorii Ukrainy za danymy suputnykovoho skanuvannia [Detection and monitoring of potentially dangerous fires on the territory of Ukraine based on satellite scanning data]. *Visnyk NAN Ukrainy [Bulletin of the National Academy of Sciences of Ukraine]*, no. 11, pp. 33–44. doi.org/10.15407/vsn2020.11.033. (in Ukr.)
12. Van Wagner C. E. (1987). *The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Technical Report 35. Ottawa, Ont., Can.: Canadian Forest Service, 1987.
13. European Fire Danger Application: Product User Guide (2018). Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2.climate.copernicus.eu.
14. Van Wagner C. E., Pickett T. L. (1985). *Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Technical Report 33, Ottawa, Ont., Can.: Canadian Forest Service, 1985.
15. Nesterov V. G., Gritchenko M. V., Shabunina T. A. (1968). Ispolzovanie temperatury tochki rosy pri raschete pokazatel'ia gorimosti lesa [Use of the dew point temperature when calculating the flammability index of the forest]. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Meteorology and hydrology], no. 9, pp. 102–104. (in Rus.)
16. Sofronov M. A., Sofronova T. M., Volokitina A. V. (2004). Otsenka pozharnoi opasnosti po usloviiam pogody s ispolzovaniem meteoprognozov [Assessment of fire danger according to weather conditions using weather forecasts]. *Lesnoye khozyaistvo* [Forestry], vol. 6. pp. 31–32. Available at: http://forest.akadem.ru/Articles/04/sofronov_1.pdf. (in Rus.)
17. Vitolo C., Di Giuseppe F., Barnard C., Coughlan R., San-Miguel-Ayán J., Libertà G., Krzeminski B. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Sci. Data*, vol. 7, p. 216. doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z.
18. Lawson B. D., Armitage O. B. (2008). *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre – Edmonton, AB, 84 p.
19. Copernicus Climate Change Service, Climate Data Store (2020). *Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projection*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
20. CORDEX scenarios for Europe from the Rossby Centre regional climate model RCA4 (2014). *Report meteorology and climatology*, vol. 116.
21. Bukovsky M. S., Mearns L. O. (2020). Regional climate change projections from NA-CORDEX and their relation to climate sensitivity. *Climatic Change*, vol. 162, pp. 645–665. doi.org/10.1007/s10584-020-02835-x.
22. Gelaro R., McCarty W., Suárez M. J. [et al.] (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, vol. 30(14), pp. 5419–5454. doi.org/10.1175/jcli-d-16-0758.1.
23. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Product Title: MODIS / Aqua+Terra Thermal Anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data). doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
24. Giglio L., Schroeder W., Justice C. O. (2016). The Collection 6 MODIS active fire detection algorithm and fire product. *Remote Sensing of Environment*, vol. 178, pp. 31–41.
25. Lazarev M. M., Otreshko L. M., Kosarchuk O. V., Polishchuk S. V., Yoshchenko L. V. (2018). Justification of the possibility of the fuel wood usage from the northern areas of Polissya. *Problems of the Chornobyl Exclusion Zone*, vol. 19, pp. 46–57.
26. Osnovni sanitarni pravyla zabezpechennia radiatsiinoi bezpeky Ukrainy [Basic sanitary rules for ensuring radiation safety of Ukraine]. Kyiv, 2005. (in Ukr.)

27. Labunska I., Levchuk S., Kashparov V., Holiaka D., Yoschenko L., Santillo D., Johnston P. (2021). Current radiological situation in areas of Ukraine contaminated by the Chornobyl accident: Part 2. Strontium-90 transfer to culinary grains and forest woods from soils of Ivankiv district. *Environment International*, vol. 146, no. 1, p. 106282.
28. Deutschen Wetterdienst – DWD. Available at: https://www.wetter3.de/Archiv/archiv_dwd.html.
29. *Naslidky vesnianykh pozhezh u Luhynskomu lishospi* [Consequences of spring fires in the Luhyn forest farm]. Available at: <https://epl.org.ua/announces/naslidky-vesnyanyh-pozhezh-u-lugynskomu-lisgospi>. (in Ukr.)
30. *Lisovi pozhezhi v Zhytomyrskii oblasti perekynulysia na sela, liudei evakuiovuiut* [Forest fires in the Zhytomyr region have spread to villages, people are being evacuated]. Available at: https://lb.ua/society/2020/04/18/455634_le-snie_pozhari_zhitomirskoy-oblasti.html. (in Ukr.)
31. *U Zhytomyrskii oblasti deviatyi den ne mozhut pohasyty lisovu pozhezhu, vyklykanu pidpalom sukhoi travy* [In the Zhytomyr region, for the ninth day, they cannot extinguish a forest fire caused by setting fire to dry grass]. Available at: https://lb.ua/society/2020/04/12/455116_zhitomirskoy-oblast_devyatyi_den.html. (in Ukr.)
32. Glagolev V. A. (2018). Algorithm of short-term forecast of meteorological fire danger in the Far East on basis of global climate models. *Regionalnye problemy* [Regional problems], vol. 21, no. 1, pp. 37–41. (in Rus.)
33. Gubenko I. M. (2012). Comparative analysis of methods for calculating fire hazard indices. *Proceedings of the Hydro-meteorological Research Center of the Russian Federation*, no. 347, pp. 207–222. (in Rus.)
34. *NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER)*. Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.

Надійшла / Received 06.10.2024

Рекомендована до друку / Accepted 24.10.2024