

УДК 630.43:681.518:551.509.32:551.583

<https://doi.org/10.33220/1026-3365.145.2024.76>

ОЦІНЮВАННЯ ЙМОВІРНИХ ЗМІН ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ У ЛІСАХ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ

С. Г. Сидоренко^{1*}, В. О. Балабух², Є. Є. Мельник³, В. П. Ворон⁴, І. М. Коваль⁵,
С. В. Сидоренко⁶

Наведено результати оцінювання ймовірних змін пожежної небезпеки в лісах України в умовах зміни клімату. Необхідною умовою оцінювання майбутніх змін горимості та щільності лісових пожеж було визначення режимів пожеж та особливостей їхнього просторового розподілу у попередні роки. Ці дані використано для оцінювання реакції режиму пожеж на зміну окремих кліматичних показників упродовж базового періоду, відносно якого оцінено прогнозовані зміни горимості лісів у періоди 2021–2040, 2041–2060, 2080–2100 рр. Всі обрахунки здійснювали на рівні адміністративних областей і в підсумкових таблицях дані групували з урахуванням лісорослинного районування України. Це надало можливість змоделювати сценарії зміни щільності та площі лісових пожеж на основі аналізу регіональних моделей зміни клімату. Водночас ці сценарії є орієнтовними та можуть бути використані як додаткові аналітичні матеріали під час стратегічного планування протипожежних заходів у лісах на рівні адміністративних областей України, створення довгострокових регіональних програм і проектів управління пожежами.

Ключові слова: лісові пожежі, горимість лісів, щільність пожеж, кліматичні чинники.

Вступ. Упродовж останніх десятиліть у країнах Європи збільшується частота виникнення великих та особливо великих лісових пожеж (Reid *et al.*, 2010; Stepanenko *et al.*, 2011; Balabukh and Zibtsev, 2016; de Rigo *et al.*, 2017; Soshenskyi *et al.*, 2021). У 2020 р. сталося декілька надзвичайно великих лісових пожеж на Поліссі та Сході України, які призвели до значних екологічних, соціальних та економічних втрат. Такі прояви зміни клімату, як тривала відсутність опадів, їхній просторовий і часовий перерозподіл, підвищення середньої і, особливо, максимальної за добу температури повітря, неминуче призводять до збільшення рівнів пожежної небезпеки в лісах України.

Підвищення середньої річної температури повітря зумовлює також збільшення повторюваності, інтенсивності й потужності хвиль тепла та спеки, коли максимальна температура повітря перевищує 35°C, а також до подовження пожежонебезпечного періоду. Повторення років із аномально теплими безсніжними зимами потенційно може сприяти зміні пожежних режимів у лісах України. Ризики пожеж також підвищуються внаслідок проявів

¹ Сидоренко Сергій Григорович, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: serhii88sido@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5972-0067>

² Балабух Віра Олексіївна, кандидат географічних наук, старший дослідник, Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України (УкрГМІ), просп. Науки, 37, Київ, 03028, Україна. E-mail: balabukh@uhmi.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3223-7531>

³ Мельник Євген Євгенович, кандидат сільськогосподарських наук, старший дослідник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: wudckij1985@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

⁴ Ворон Володимир Пантелеймонович, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: 52corvus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>

⁵ Коваль Ірина Михайлівна, доктор сільськогосподарських наук, старший науковий співробітник, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: koval_iryana@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>

⁶ Сидоренко Світлана Вікторівна, кандидат сільськогосподарських наук, Український науково-дослідний інститут лісового господарства та агролісомеліорації ім. Г. М. Висоцького, вул. Григорія Сковороди, 86, Харків, 61024, Україна. E-mail: svit23sydorenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-7614>

* Адреса для кореспонденції: serhii88sido@gmail.com

аномальних умов погоди (тривалих посух, значного збільшення швидкості вітру під час пожежонебезпечного періоду тощо) (Reid *et al.*, 2010; de Rigo *et al.*, 2017)

Основними чинниками, які зумовлюють підвищення пожежної небезпеки та збільшують імовірність виникнення пожеж, є характеристики клімату регіону, соціально-економічних (антропогенних) умов і насаджень певної території (Sydorenko *et al.*, 2021).

Ймовірно, що аномальні умови, які були сприятливими для виникнення пожеж 2015 та 2020 рр., повторюватимуться дедалі частіше, а війна, розв'язана Росією, лише посилить цю негативну тенденцію. Подальша зміна клімату неминуче призведе до підвищення рівня пожежної небезпеки лісів України, збільшення щільності лісових пожеж і підвищення горимості лісів. Зважаючи на це, система охорони лісів і ландшафтів від пожеж має ґрунтуватися на аналізі як поточних, так і нових потенційних ризиків та загроз. Тому відповідні служби мають бути готовими до боротьби з такими пожежами, а прогнозовані зміни пожежних режимів слід брати до уваги під час стратегічного планування комплексу протипожежних заходів на регіональному рівні.

Мета досліджень – оцінювання проєкцій окремих показників пожежної небезпеки за умовами погоди з урахуванням сценаріїв зміни клімату та їхнього впливу на горимість лісів.

Матеріали й методи. Необхідними умовами оцінювання ймовірних змін горимості та щільності лісових пожеж є визначення режимів пожеж та особливостей їхнього просторового розподілу у попередні роки. Ці дані використано для оцінювання реакції режиму пожеж на зміну окремих кліматичних показників упродовж базового періоду (1981–2010 рр.), відносно якого оцінювали прогнозовані зміни горимості лісів у періоди 2021–2040, 2041–2060 та 2080–2100 рр.

Усі обрахунки здійснювали на рівні адміністративних областей, а в підсумкових таблицях дані групували з урахуванням лісорослинного районування України (Pasternak, 1990). У випадках, якщо територія адміністративної області одночасно належить до кількох природних зон, її зараховували до природної зони, у якій знаходиться більшість її території.

Вхідні дані для оцінювання зміни горимості лісів та щільності пожеж унаслідок кліматичних змін. Проаналізовано базу даних лісових пожеж в Україні, яка охоплювала всю територію країни, зокрема період 2007–2021 рр. на рівні регіонів (дані за 2022 та 2023 рр. не брали до аналізу через значний вплив бойових дій). На основі статистичних даних лісових пожеж розраховано часові та просторові тенденції виникнення пожеж, горимість лісів і щільність пожеж у різних регіонах України (*Rules of fire safety in the forests of Ukraine*, 2005).

Щільність лісових пожеж (R_{dens}) для кожної адміністративної області розраховано за формулою (1):

$$R_{dens} = \frac{1000 \sum_{i=1}^n N_i}{n \times F_{for.area}} , \quad (1)$$

де R_{dens} – середня багаторічна щільність пожеж на 1 000 га площі лісів (кількість випадків за n років спостережень у перерахунку на 1 000 га земель лісового фонду);

N_i – кількість лісових пожеж за досліджуваний період (n), кількість випадків;

n – кількість років спостережень (не менше ніж 10 років);

$F_{for.area}$ – загальна площа лісів області, га.

Фактичну горимість лісів за площею ($R_{f.comb}$) для кожної адміністративної області розраховано за формулою (2):

$$R_{f.comb} = \frac{1000 \sum_{i=1}^n F_{burnt.area}}{n \times F_{for.area}} , \quad (2)$$

де $R_{f.comb}$ – значення фактичної горимості лісів у перерахунку на 1 000 га (площа пожеж, га, за n років спостережень у перерахунку на 1 000 га земель лісового фонду);

$F_{burnt.area}$ – щорічна площа лісових пожеж (відношення сумарної площі пожеж, га до кількості років спостереження); n – кількість років спостережень (не менше ніж 10 років); $F_{for.area}$ – загальна площа лісів області, га.

Оцінювання впливу окремих кліматичних змінних на ризики виникнення пожеж.
 Вплив окремих чинників на показників щільності пожеж і горимості лісів оцінювали спочатку за базовий період на рівні регіонів (табл. 1).

Таблиця 1

Показники кліматичної норми за регіонами (1981–2010 рр.)

Table 1

Indicators of the climatic norm by regions (1981–2010)

Область Region	$N_{\text{бездош}}$, дні $N_{\text{no rain}}$, days	D_{35C} , дні D_{35C} , days	$T_{\text{сер р}}$, °C $T_{y\text{-avg}}$, °C	W , $\text{m}\cdot\text{c}^{-1}$ W , $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	N , мм N , mm	FWI FWI	$R_{f, \text{comb}}$	R_{dens}
Вінницька	24,85	2,91	8,40	4,12	1,64	9,92	0,05	0,04
Волинська	20,38	1,47	7,88	4,22	1,84	5,45	0,05	0,03
Дніпропетровська	29,70	6,27	9,67	4,32	1,52	27,96	2,31	1,27
Донецька	30,05	5,96	9,50	4,28	1,56	16,47	1,56	1,11
Житомирська	22,04	1,94	7,70	4,08	1,81	4,50	0,19	0,11
Закарпатська	20,26	1,39	7,09	3,02	3,47	2,69	0,02	0,01
Запорізька	33,07	6,89	10,70	4,52	1,41	25,99	1,58	1,35
Івано-Франківська	19,02	0,90	7,10	3,72	2,37	1,98	0,00	0,01
Київська	23,84	2,78	8,14	4,10	1,72	6,30	1,79	0,56
Кіровоградська	27,84	4,76	9,14	4,31	1,55	23,58	0,06	0,19
АР Крим	37,25	5,03	11,95	4,43	1,41	32,99	1,04	0,00
Луганська	27,93	5,16	8,60	4,25	1,59	26,10	4,47	1,09
Львівська	19,09	1,07	7,73	4,12	2,17	3,22	0,06	0,03
Миколаївська	31,80	7,41	10,43	4,35	1,38	33,16	0,77	0,77
Одеська	32,53	6,94	10,87	4,28	1,32	20,50	0,20	0,14
Полтавська	26,19	3,94	8,52	4,31	1,66	15,24	0,24	0,31
Рівненська	20,80	1,64	7,82	4,17	1,86	4,70	0,11	0,07
Сумська	23,42	2,30	7,17	4,25	1,82	6,36	0,23	0,26
Тернопільська	21,17	1,38	7,85	4,24	1,84	4,22	0,01	0,01
Харківська	26,71	4,11	8,25	4,26	1,66	14,84	0,67	0,65
Херсонська	35,62	7,96	11,54	4,57	1,26	49,70	10,65	1,89
Хмельницька	22,21	1,79	7,96	4,28	1,77	5,12	0,20	0,09
Черкаська	25,86	3,49	8,66	4,21	1,64	14,29	0,11	0,46
Чернівецька	21,88	2,01	7,95	3,61	1,97	4,55	0,01	0,01
Чернігівська	22,86	2,26	7,36	4,18	1,81	6,37	0,31	0,16

Примітка. $N_{\text{бездош}}$ – середня за рік тривалість бездошового періоду впродовж вегетаційного періоду, дні; D_{35C} – середня за рік кількість днів із максимальною денною температурою повітря понад 35°C; $T_{\text{сер р}}$ – середня за рік температура повітря, °C; W , – середня за рік швидкість вітру, $\text{m}\cdot\text{c}^{-1}$; N – усереднена денна норма кількості опадів, мм; FWI – середнє за рік значення індексу пожежної небезпеки за умовами погоди; $R_{f, \text{comb}}$ – фактична горимість лісів (площа пожеж, га, на 1 000 га земель лісового фонду); R_{dens} – щільність лісових пожеж у лісовому фонді, випадків на 1 000 га.

Note: $N_{\text{no rain}}$ – yearly average dry spell period during the vegetation period, days; D_{35C} – number of days with maximum temperature higher than 35°C; $T_{y\text{-avg}}$ – yearly average air temperature, °C; W – yearly average wind speed, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; N – average precipitation per day, mm; FWI – Fire Weather Index; $R_{f, \text{comb}}$ – forest burnability (fire area, ha per 1,000 ha); R_{dens} – forest fire density, the number of the fires per 1,000 ha.

Як кліматичну основу використано дані з ініціативи EURO-CORDEX, яка є європейським відділом міжнародної ініціативи CORDEX, створеної за сприяння Світової програми досліджень клімату (WRCP), з метою координації зусиль для складання покращених регіональних прогнозів зміни клімату для всіх регіонів світу. Результати CORDEX використано як вхідні дані для досліджень впливу зміни клімату та адаптації в межах Шостого звіту (AR5) Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) (Moss *et al.*, 2008; Gao, 2017; Huppmann *et al.*, 2018). Таким чином,

з використанням растрових шарів CORDEX обраховано кліматичні норми за період 1980–2010 рр. для території України. Побудовано низку тематичних шарів із використанням програмних продуктів QGIS та бібліотек просторового аналізу даних на мові програмування R. Ці шари відображають середні багаторічні значення кліматичних показників за базовий період (середню та середню максимальну за рік температуру повітря, середню за рік швидкість вітру, кількість опадів, тривалість посушливих періодів, тривалість та інтенсивність посухи (SPI), кількість днів із максимальною денною температурою повітря понад 35°C, потенційну тривалість бездошових періодів, пожежну небезпеку за умовами погоди (FWI) тощо) та сценарні значення проєкцій зміни клімату.

Кореляційний і множинний регресійний аналіз проведено за стандартними методами (Cherup, 2015), базові скрипти для кореляційного та регресійного аналізу підготовлено на мові програмування R. Рівні значущості для коефіцієнтів кореляції оцінювали за шкалою (Iturbide *et al.*, 2021):

- практично не викликає сумнівів ($p \leq 0,01$), ймовірність 99–100 %;
- дуже ймовірно ($0,01 < p \leq 0,1$), ймовірність 90–99 %;
- ймовірно ($0,1 < p \leq 0,34$), ймовірність 66–90 %;
- так само ймовірно, як ні ($0,1 < p \leq 0,34$), ймовірність 66–33 %;
- мало ймовірно ($0,67 < p \leq 0,90$), ймовірність 10–33 %;
- дуже мало ймовірно ($0,90 < p \leq 0,99$), ймовірність 1–10 %;
- виключно мало ймовірно ($p > 0,99$), ймовірність 0–1 %.

Аналіз кліматичних показників за період 2007–2021 рр. за регіонами виконано з використанням бази даних E-OBS (Cornes *et al.*, 2018) та попередньо створених скриптів на мові програмування R. Це дало змогу визначити кліматичні показники для кожного року в контексті адміністративних областей.

Додатково використано базу даних проєкту PESETA IV PROJECT, люб'язно надану експертами JRC для території Східної Європи (Haylock *et al.*, 2008; Dosio *et al.*, 2012; Dosio, 2016; de Rigo *et al.*, 2017; 2020). Так, було інтегровано геопросторову базу даних FWI, що відображала кількість днів упродовж пожежонебезпечного періоду, з високими значеннями FWI (понад 30 балів) для базового періоду (1980–2010 рр.).

Підбір сценаріїв для кількісного оцінювання зміни клімату та можливих наслідків для пожежної стійкості лісів. У дослідженні використано набір сценаріїв Всесвітньої програми досліджень клімату (World Climate Research Programme), а саме Репрезентативні шляхи концентрації (Representative Concentration Pathways – RCP). Сценарії RCP4.5 і RCP6.0 передбачають стабілізацію викидів парникових газів в атмосферу, RCP8.5 – збільшення обсягів викидів парникових газів, а сценарій RCP2.6 – зменшення обсягів цих викидів (Adamenko *et al.*, 2011; Polevoy *et al.*, 2017; Sydorenko and Sydorenko, 2020).

Застосовано проєкції елементів (окремих кліматичних змінних) в ансамблях кліматичних моделей для Центральної Європи з урахуванням різних підходів до оцінювання прогнозованих обсягів викидів та їхнього впливу на глобальне підвищення температури (RCP): RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 8.5. Для оцінювання взято основні показники клімату: середню та середню максимальну за рік температуру повітря (ансамбль із 20 моделей), кількість опадів на рік (ансамбль із 21 моделі) та середню на рік швидкість вітру (ансамбль із 19 регіональних моделей). Як похідні показники застосували максимальну тривалість бездошових періодів (ансамбль із 18 регіональних моделей) та кількість днів із температурою повітря понад 35°C (ансамбль із 19 регіональних моделей).

Результати. За результатами попереднього кореляційного аналізу (табл. 2) виокремлено список дієвих кліматичних змінних, які впливають на щільність пожеж і горимість лісів: кількість днів із температурою понад 35°C, кількість опадів ($N_{\text{опадів}}$) та індекс пожежонебезпечної погоди (FWI), який є комплексним показником, що певною мірою враховує попередні змінні.

Кореляційна матриця кліматичних змінних, які впливають на щільність пожеж і горимість лісів

Table 2

Correlation matrix of variables that affect the density of fires and forest burnability

Змінні Variables	Показник Indicator	$N_{\text{no rain}}$	D_{35C}	$T_{\text{сер p}} T_{y\text{-avg}}$	Wind	$N_{\text{опадів}}$	FWI	R_{comb}	R_{dens}	% pine forest	SPI
Dry_days	<i>r</i>	1,000	0,930	0,960	0,610	-0,690	0,920	0,530	0,640	-0,070	-0,340
	<i>p</i> value	нд	0,0001	0,0001	0,001	0,0001	0,0001	0,006	0,001	0,740	0,092
D_{35C}	<i>r</i>	0,930	1,000	0,880	0,590	-0,680	0,910	0,570	0,770	-0,060	-0,470
	<i>p</i> value	0,0001	нд	0,0001	0,002	0,0001	0,0001	0,003	0,0001	0,792	0,019
$T_{\text{сер p}}$	<i>r</i>	0,960	0,880	1,000	0,600	-0,680	0,890	0,510	0,560	-0,110	-0,260
	<i>p</i> value	0,0001	0,0001	нд	0,002	0,0001	0,0001	0,010	0,004	0,607	0,212
Wind	<i>r</i>	0,610	0,590	0,600	1,000	-0,920	0,600	0,370	0,480	0,330	-0,260
	<i>p</i> value	0,001	0,002	0,002	нд	0,0001	0,002	0,071	0,015	0,105	0,215
$N_{\text{опадів}}$	<i>r</i>	-0,690	-0,680	-0,680	-0,920	1,000	-0,640	-0,360	-0,480	-0,230	0,520
	<i>p</i> value	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	нд	0,001	0,081	0,016	0,262	0,007
FWI	<i>r</i>	0,920	0,910	0,890	0,600	-0,640	1,000	0,720	0,780	0,010	-0,260
	<i>p</i> value	0,0001	0,0001	0,0001	0,002	0,001	нд	0,0001	0,0001	0,948	0,206
R_{comb}	<i>r</i>	0,530	0,570	0,510	0,370	-0,360	0,720	1,000	0,800	0,310	0,050
	<i>p</i> value	0,006	0,003	0,010	0,071	0,081	0,0001	нд	0,0001	0,130	0,823
R_{dens}	<i>r</i>	0,640	0,770	0,560	0,480	-0,480	0,780	0,800	1,000	0,190	-0,200
	<i>p</i> value	0,001	0,0001	0,004	0,015	0,016	0,0001	0,0001	нд	0,363	0,343
% pine forest	<i>r</i>	-0,070	-0,060	-0,110	0,330	-0,230	0,010	0,310	0,190	1,000	0,200
	<i>p</i> value	0,740	0,792	0,607	0,105	0,262	0,948	0,130	0,363	нд	0,340
SPI	<i>r</i>	-0,340	-0,470	-0,260	-0,260	0,520	-0,260	0,050	-0,200	0,200	1,000
	<i>p</i> value	0,092	0,019	0,212	0,215	0,007	0,206	0,823	0,343	0,340	0,067

Примітка. % pine forest – частка площі хвойних лісів, %; SPI – стандартизований індекс посух; нд – немає даних.

Note. % pine – percentage of coniferous forests' area; SPI – standardised precipitation index.

За шкалою, запропонованою IPCC, рівень значущості кореляційних зв'язків кліматичних змінних зі щільністю пожеж не викликає сумнівів: кількість днів із температурою повітря понад 35 °C ($r = 0,77, p = 0,001$), кількість опадів ($N_{\text{опадів}}$) ($r = -0,48, p = 0,016$) та FWI ($r = 0,78, p = 0,001$).

Зв'язки кліматичних даних зі змінами тенденцій виникнення лісових пожеж, виражених через показники щільності пожеж і горимості лісів, досліджено за допомогою кореляційного аналізу та відсіяно змінні, що корелювали між собою. Для адміністративних областей побудовано регресійні моделі для визначення впливу окремих кліматичних показників на кількість (щільність пожеж) і площі (горимість лісів). Використання показників кількості опадів та кількості днів із температурою повітря понад 35°C виявляється найбільш доцільним і дає змогу моделювати на прийнятному рівні зміни щільності пожеж на тривалий період (табл. 3). Деякі протестовані регресійні моделі прогнозування горимості лісів (площі лісових пожеж на 1 000 га лісу), що охоплювали більшість предикторів, не мали достатніх точності та рівня адекватності, а стандартні похибки цих моделей перевершували середні значення горимості пожеж в Україні. Тому такі моделі було відхилено. Зважаючи на це, запропоновано оцінювати щільність лісових пожеж за формулою (3):

$$R_{\text{dens}} = I + a_1 \times P + a_2 \times D_{35C}, \quad (3)$$

де R_{dens} – щільність лісових пожеж (кількість випадків пожеж на 1 000 га лісу);

I – вільний член регресійного рівняння (для кожного регіону) (табл. 3);

a_1 – коефіцієнт регресії a_1 (табл. 3, для кількості опадів);

P – середня кількість опадів на рік, мм

a_2 – коефіцієнт регресії a_2 (табл. 3, для кількості днів із температурою понад 35°C);
 D_{35C} – кількість днів із температурою понад 35°C.

Таблиця 3

Коефіцієнти регресійної моделі, яка охоплює регіональний чинник

Table 3

Coefficients of the regression model, which includes the regional factor

Область Region	Коефіцієнт регресії a_1 (опад) Regression coefficient a_1 (rainfall)	Коефіцієнт регресії a_2 (дні з $T^{\circ}C > 35^{\circ}C$) Regression coefficient a_2 (days with $T^{\circ}C > 35^{\circ}C$)	Вільний член регресійного рівняння (Intercept) The free term of the regression equation (Intercept)
Вінницька	-0,00082	0,03112	0,107
Волинська	-0,00082	0,03112	0,370
Дніпропетровська	-0,00082	0,03112	1,563
Донецька	-0,00082	0,03112	1,406
Житомирська	-0,00082	0,03112	0,590
Закарпатська	-0,00082	0,03112	0,639
Запорізька	-0,00082	0,03112	0,995
Івано-Франківська	-0,00082	0,03112	0,486
Київська	-0,00082	0,03112	0,961
Кіровоградська	-0,00082	0,03112	0,419
Крим	-0,00082	0,03112	0,229
Луганська	-0,00082	0,03112	1,370
Львівська	-0,00082	0,03112	0,610
Миколаївська	-0,00082	0,03112	1,122
Одеська	-0,00082	0,03112	0,398
Полтавська	-0,00082	0,03112	0,583
Рівненська	-0,00082	0,03112	0,598
Сумська	-0,00082	0,03112	0,657
Тернопільська	-0,00082	0,03112	0,369
Харківська	-0,00082	0,03112	0,928
Херсонська	-0,00082	0,03112	1,910
Хмельницька	-0,00082	0,03112	0,530
Черкаська	-0,00082	0,03112	0,769
Чернівецька	-0,00082	0,03112	0,321
Чернігівська	-0,00082	0,03112	0,629

Примітка. $R^2 = 0.695$, $F_f = 24.05$, $d_f = 349$, p -value < 0.001 . Залишкова стандартна помилка = 0,213.

Note. $R^2 = 0.695$, $F_f = 24.05$, $d_f = 349$, p -value < 0.001 . Residual standart error = 0.213.

Виявлено, що кількість днів із температурою понад 35°C (D_{35C}) за даними проєкції зміни клімату є найбільш варіабельним показником: до кінця століття відхилення від норми може збільшитися на десятки відсотків, а за деяких сценаріїв (RCP8.5) – у декілька разів перевищити норму (рис. 1).

Так, за сценарію RCP8.5 кількість днів із температурою понад 35°C у 2081–2100 рр. збільшиться у 3,74–9,50 разу, у 2041–2060 рр. може зрости від 143 до 197 % (майже вдвічі), а у 2021–2040 рр. – від 70 до 103 % відносно кліматичного періоду 1981–2010 рр. У зоні Степу значення показника за областями будуть подібними та змінюватимуться від 374 до 504 % у 2081–2100 рр., від 143 до 175 % у 2041–2060 рр. та від 57 до 90 % у 2021–2040 рр. У зоні Лісостепу кількість спекотних днів буде більшою, ніж у Степу. Так, у 2081–2100 рр. показник збільшиться від 476 до 817 %, у 2041–2060 – від 166 до 277 %, у 2021–2040 рр. – від 80 до 103 %.

За сценарію RCP4.5 (рис. 1) максимальне збільшення кількості днів із температурою повітря понад 35° (до 230 % від норми) також очікують на кінець століття (2081–2100 рр.) з найбільшими змінами в Українських Карпатах та Кримських горах. Великі перевищення норми (від 110 до 140 %) ймовірні для зон Лісостепу та Полісся. У більшості областей степової зони цей показник становить 100 %. До середини століття за сценарію RCP4.5 прогнозують

суттєве збільшення кількості спекотних днів – від 60 до 100 % для областей, приурочених до природних зон Українських Карпат і Кримських гір, а також зони Лісостепу. Найменші зміни показника (40 %) у цей період імовірні на Поліссі та в деяких областях Лісостепу. У 2021–2040 рр. за сценарієм RCP4.5 зміни будуть зовсім несуттєвими або відбудеться навіть зменшення кількості спекотних днів у деяких областях зон Лісостепу і Полісся (Тернопільська область – -4,3 %, Волинська – -2,1 %, Хмельницька – -0,9 %). Максимальне відхилення від норми становитиме 32,7 % (наприклад, для Закарпатської області).

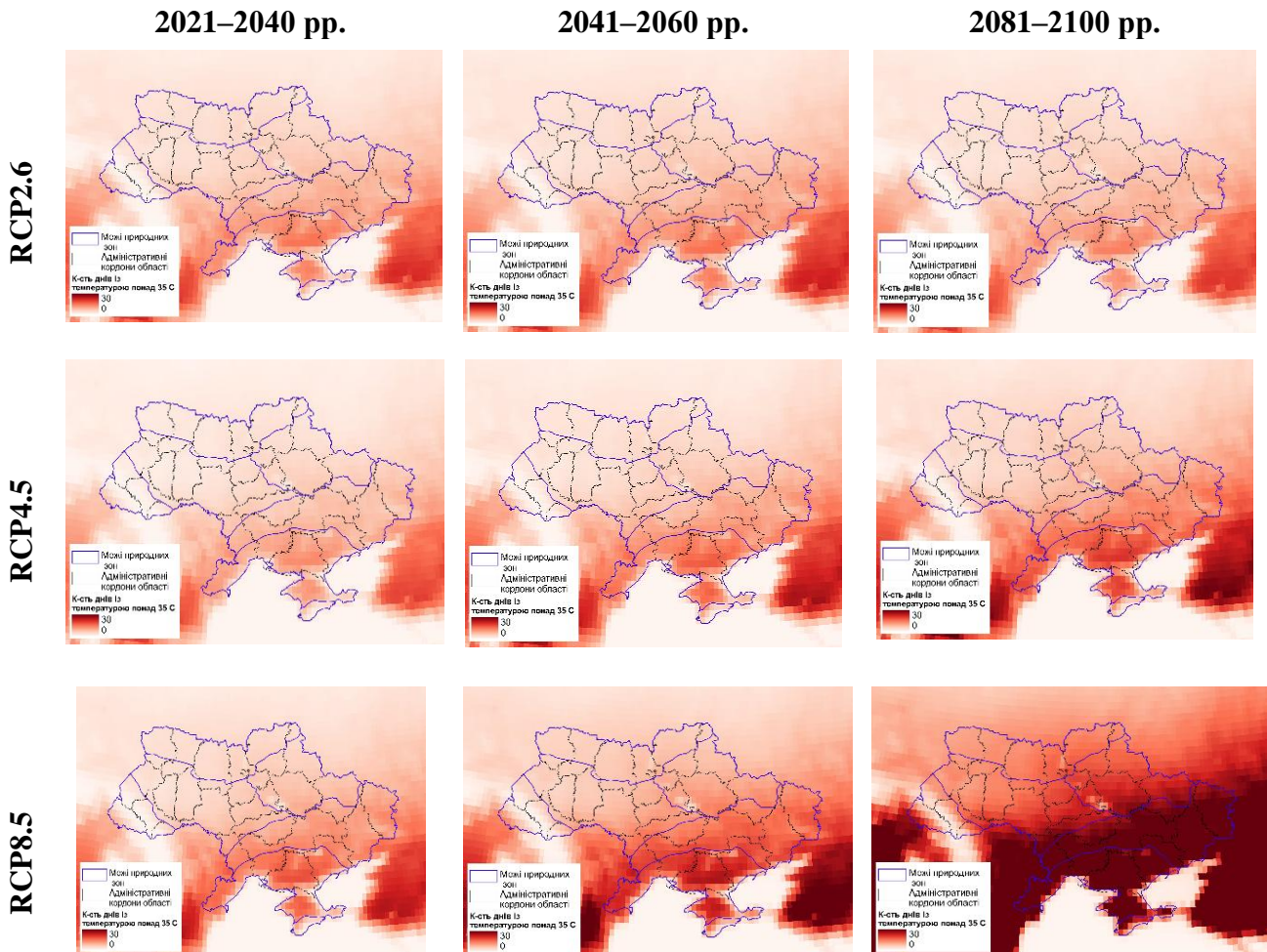


Рис. 1 – Кількість днів із температурою повітря понад 35°C за різних сценаріїв зміни клімату, у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі
Fig. 1 – The number of days with an air temperature above 35°C under different climate change scenarios, in different periods

За сценарію RCP2.6 (рис. 1) максимальне збільшення кількості спекотних днів імовірно відбудеться в Українських Карпатах, на Поліссі та в Лісостепу (від 61 до 90 % у 2081–2100 рр., від 49 до 97 % у 2041–2060 рр. та від 42 до 74 % у 2021–2040 рр.). Найменші зміни будуть характерними для більшості областей зони степу (приблизно 30–40 %). За такого сценарію для більшості областей України не виявлено суттєвих змін показника у 2021–2040, 2041–2060 та 2081–2100 рр.

Середня кількість опадів на рік (RCP2.6 до середини століття) для більшості областей прогнозовано збільшуватиметься, порівнюючи з кліматичною нормою (до 12 %), лише в окремих регіонах кількість опадів зменшиться незначною мірою – до -3,2 % (рис. 2).

Незначне зменшення кількості опадів буде характерним для більшості областей Полісся за RCP2.6.

У короткостроковій перспективі (2021–2040 рр.) очікують збільшення кількості опадів за рік на 5–9 % від норми за сценарію RCP4.5 та на 0,7–3,5 % за сценарію RCP8.5. До середини століття (2040–2060 рр.) їхня кількість може збільшитися від 4,3 до 8,7 % за сценарію RCP4.5 і від 3,1 до 8,6 % за сценарію RCP8.5. До кінця століття (2081–2100 рр.) найбільші зміни кількості опадів прогнозовано за сценарієм RCP4.5. Їхня кількість за рік може збільшитися від 7 до 12 %, порівнюючи із середніми багаторічними даними 1981–2010 рр. (рис. 2).

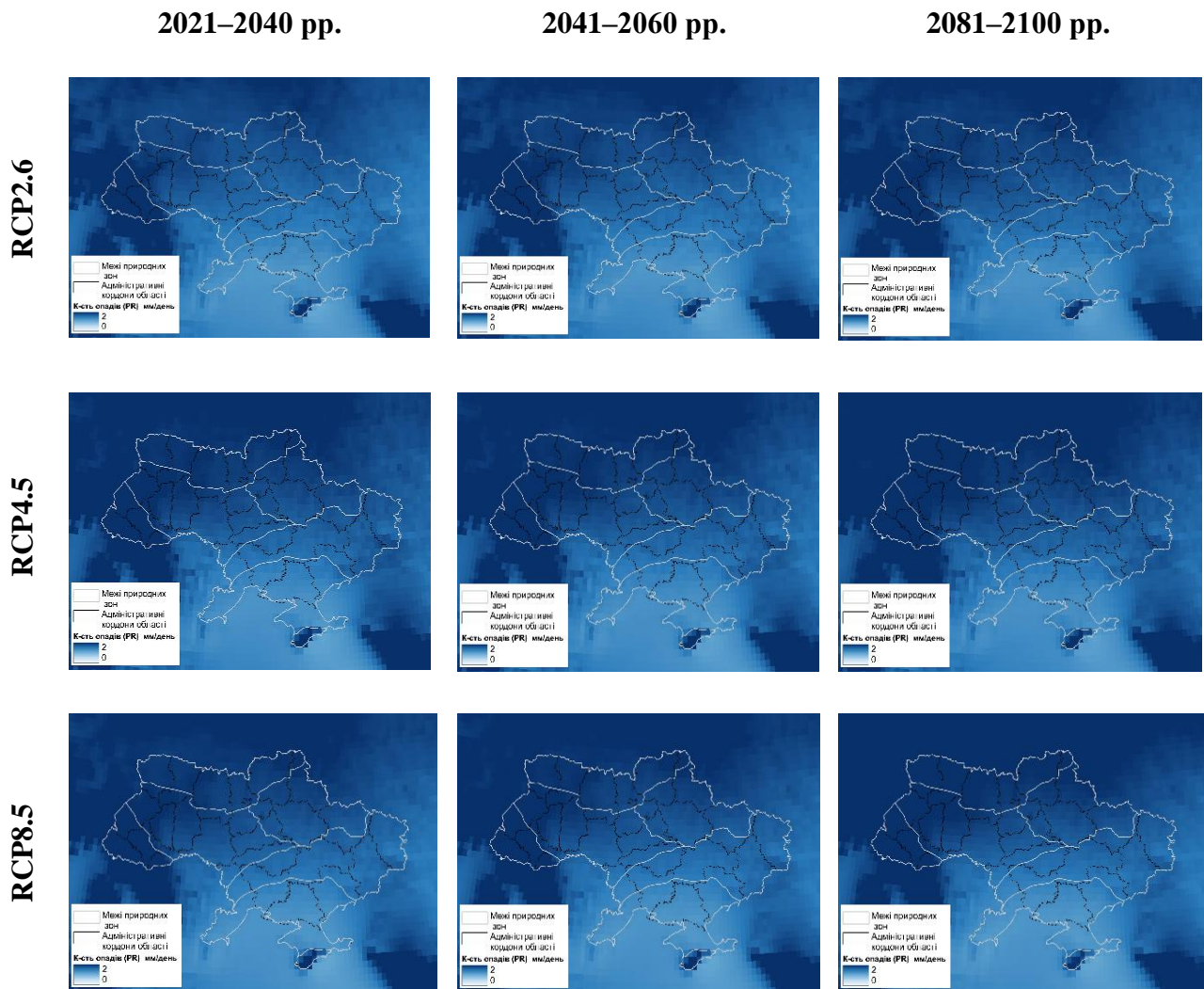


Рис. 2 – Середня кількість опадів за різних сценаріїв зміни клімату (відхилення від норми, %) у різні часові періоди

Fig. 2 – Average precipitation under different climate change scenarios (deviation from the norm, %) in different periods

Збільшення кількості днів із високим класом пожежної небезпеки (зі значенням FWI понад 30), як порівняти з базовим періодом (1980–2010 рр.), виявлено лише за сценарію RCP8.5 у разі підвищення середньої за рік глобальної температури повітря на 2°C до середини XXI століття, порівнюючи з кінцем XX століття (рис. 3). Найбільше підвищення пожежної небезпеки очікують у південно-східних регіонах України та на південній межі лівобережного Лісостепу, а також в Українських Карпатах та Кримських горах.

Незначне зменшення пожежної небезпеки завдяки підвищенню кількості опадів очікують у Волинській області та західній частині правобережного Лісостепу (рис. 3).

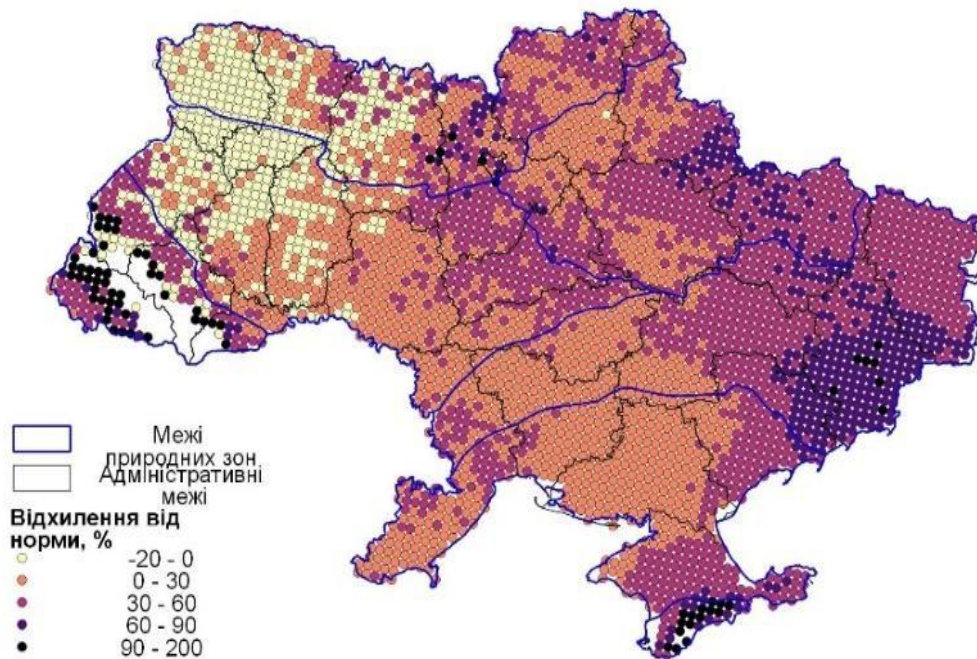


Рис. 3 – Кількість днів із високим рівнем пожежної небезпеки за умовами погоди (відхилення значень FWI понад 30 % від норми за сценарієм RCP8.5)
 Fig. 3 – Number of days with high fire danger rates according to weather conditions (deviation of FWI values is above 30 % from the norm under the RCP8.5 scenario)

Оцінювання щільності пожеж за сценарію RCP2.5, який є найбільш оптимістичним і передбачає дуже низький рівень концентрації парникових газів до кінця століття, виявило відсутність відхилення показника FWI від норми або незначне відхилення в межах статистичної похибки. Така тенденція є характерною для областей зони Лісостепу (Тернопільська, Сумська, Вінницька, Полтавська, Кіровоградська області) та регіону Карпат (Чернівецька, Івано-Франківська, Закарпатська області). У природній зоні Полісся відсутність змін є ймовірною у Волинській та Рівненській областях. У Київській, Житомирській та Чернігівській областях щільність пожеж несуттєво збільшиться. Найбільш загрозованою ситуація може бути у наступні десятиріччя в степовій зоні, за винятком Запорізької області, де значення показника FWI ймовірно залишаться в межах норми. За прогнозними даними можна очікувати збільшення щільності та площі пожеж у Луганській та Херсонській областях, де за даними моделювання ризик виникнення лісових пожеж буде одним із найвищих в Україні.

Згідно зі сценарієм RCP4.5 імовірними є незначні зміни щільності лісових пожеж на всій території України. Лише в Степу у 2021–2040 рр. очікується збільшення цього показника.

За сценарієм RCP8.5 (табл. 4, рис. 4) в усіх природних зонах України відбудуться суттєві зміни пожежних режимів. З кожним десятиріччям прогнозують збільшення щільності та площі пожеж. Згідно із цим сценарієм, загроза виникнення пожеж суттєво збільшуватиметься в кожній області, але інтенсивність цих змін буде різною. Найбільш загрозованою ситуація виглядатиме в Степу, де прогнозована щільність пожеж збільшиться вдвічі, порівнюючи з базовим періодом. Наприклад, у Луганській області, де значення всіх параметрів моделі доволі високі, кількість пожеж імовірно збільшиться від 301 у 2007–2021 рр. до 539 у 2081–2100 рр. Лише в Українських Карпатах зміни щільності лісових пожеж залишаться ймовірно незначними.

Таблиця 4

Зміна щільності, кількості та площі лісових пожеж за сценарієм RCP8.5

Table 4

Change in the density, number and area of forest fires under the RCP8.5 scenario

Область Region	Норма (2007–2021) Norm (2007–2021)		Щільність пожеж RCP8.5 Fire density RCP8.5			К-сть пожеж RCP8.5 Number of fires RCP8.5			Площа пожеж RCP8.5 Area of fires RCP8.5		
	Сер площа, га Average area, ha	Кіль- кість Num- ber	2030	2050	2090	2030	2050	2090	2030	2050	2090
Степ											
Луганська	4,11	301	1,190	1,317	1,842	348	385	539	1429,8	1582,6	2213,8
Донецька	1,06	189	1,275	1,427	2,008	235	263	370	248,7	278,6	391,8
Запорізька	1,17	123	0,939	1,112	1,695	95	112	171	110,9	131,4	200,3
Дніпропетров- ська	1,82	217	1,434	1,589	2,103	257	285	377	467,8	518,1	685,8
Херсонська	5,64	216	1,938	2,121	2,704	225	247	314	1271,3	1391,5	1773,6
Одеська	1,46	30	0,352	0,533	1,078	72	109	220	104,8	158,8	321,0
Миколаївська	0,99	76	1,077	1,254	1,790	106	123	176	104,7	121,9	174,0
Лісостеп											
Тернопільська	1,09	1	бз	бз	0,154	бз	бз	28	бз	бз	бз
Хмельницька	2,20	25	0,073	0,158	0,390	19	42	103	42,3	92,1	227,3
Сумська	0,90	100	0,217	0,289	0,553	92	123	235	83,1	110,5	211,7
Вінницька	1,15	13	бз	бз	0,184	бз	бз	64	бз	бз	73,5
Харківська	1,03	240	0,648	0,764	1,185	245	289	448	252,6	297,7	461,6
Черкаська	0,25	136	0,448	0,557	0,908	141	175	286	35,3	43,9	71,5
Полтавська	0,78	77	0,28	0,385	0,755	69	95	187	54	74,3	145,7
Кіровоградська	0,33	28	0,196	0,335	0,768	32	55	126	10,6	18,2	41,7
Широколистяно-лісова зона											
Київська	3,20	318	0,570	0,662	0,938	356	413	585	1138,5	1321,2	1873,0
Житомирська	1,73	137	0,127	0,204	0,414	127	204	415	220,1	353,0	717,6
Чернігівська	1,92	104	0,183	0,253	0,487	122	169	324	234,2	323,7	622,5
Волинська	1,42	25	бз	бз	0,071	бз	бз	44	бз	бз	63,0
Рівненська	1,58	51	0,101	0,158	0,330	74	115	241	116,7	181,8	380,8
Українські Карпати											
Львівська	1,86	17	бз	0,039	0,196	бз	24	122	бз	бз	бз
Чернівецька	1,19	1	бз	бз	0,017	бз	бз	3	бз	бз	бз
Івано- Франківська	2,25	1	бз	бз	0,008	бз	бз	5	бз	бз	бз
Закарпатська	2,79	14	бз	бз	бз	бз	бз	бз	бз	бз	бз
Гірський Крим											
Крим	2,78	90	0,09	0,249	0,8	25	69	223	бз	192,7	619,6

Примітка. бз – без змін; нд – немає даних.

Note. бз – unchanged; нд – no data.

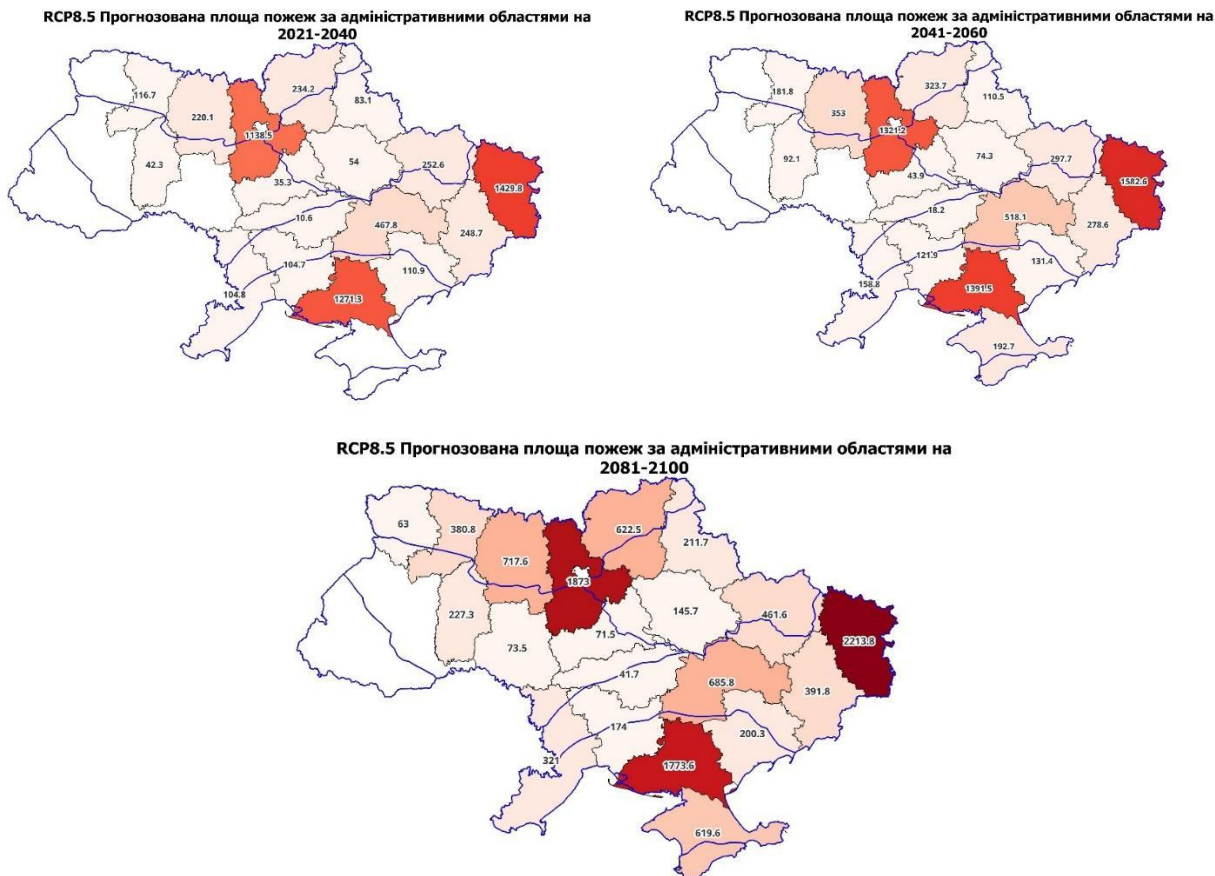


Рис. 4 – Проекція зміни усереднених за областями площ лісових пожеж за сценарієм RCP8.5 у коротко-, середньо- та довгостроковій перспективі відносно 1981–2010 рр.
Fig. 4 – Projected changes in the average area of forest fires under different scenarios

Обговорення. Завдяки нашим дослідженням визначено найбільш пожежонебезпечні, уразливі регіони за певних сценаріїв зміни клімату. Ця інформація може бути базою для подальшого аналізу кліматичних, соціально-економічних і природних чинників, які підвищують ризики виникнення пожеж. Такі дослідження можуть забезпечити надалі розроблення лісопожежного районування на базі створених попередньо тематичних шарів за чинниками, що мають прямий чи опосередкований вплив на пожежні ризики.

За результатами наших досліджень найвищі ризики виникнення лісових пожеж будуть зберігатися у Херсонській, Луганській, Дніпропетровській, Запорізькій областях. Також значну щільність пожеж визначено в Київській області, що пояснюється значною щільністю населення в регіоні.

Подібні дослідження з оцінювання впливу кліматичних чинників на кількість і площу лісових пожеж вже було проведено у північно-чорноморському регіоні України на прикладі Херсонської області (Balabukh and Zibtsev, 2016). У роботі встановлено кількісні зв'язки між рівнем пожежної небезпеки в цьому регіоні та термічним і вітровим режимами, а також із режимом зволоження. Також доведено визначальний вплив температури повітря на ступінь природної пожежної небезпеки в досліджуваному регіоні. Дослідження показали, що цей вплив найбільше позначається на площі пожеж і значно менше – на їхній кількості. Також було показано можливі зміни кліматичних характеристик та екстремальних погодних умов Херсонської області у 2021–2050 рр. відносно сучасного кліматичного періоду (1981–2010 рр.) для сценарію SRES A1B та їхній вплив на лісові пожежі. За результатами цього дослідження очікують збільшення кількості спекотних днів, тривалості спекотного періоду та інтенсивності гроз на Херсонщині. Ці автори ще у 2016 р. вказали на перспективи оцінювання ризиків

природної пожежної небезпеки всіх регіонів України з урахуванням різних сценаріїв зміни клімату (Balabukh and Zibtsev, 2016).

Закордонні вчені зазначають, що зміна клімату спричинила частіші випадки екстремальних кліматичних явищ загалом у світі (Reid *et al.*, 2010; de Rigo *et al.*, 2017; 2020; Xing *et al.*, 2023). Наприклад, у Китаї доведено тісні кореляційні залежності виникнення масштабних лісових пожеж від певних кліматичних чинників (Xing *et al.*, 2023).

Слід враховувати, що пожежна небезпека не обов'язково збільшиться в усіх регіонах країни. Як свідчать наші дослідження, в окремих регіонах рівень небезпеки через кліматичні зміни може зменшитися внаслідок збільшення кількості опадів (Українські Карпати та північний захід країни).

Важливо оцінювати зміни пожежної небезпеки не тільки для лісів, але й для всіх типів природних і антропогенно змінених ландшафтів на прилеглих територіях. Слід враховувати, що під час тривалих посух значна частка рослинних горючих матеріалів як із групи живих, так і відмерлих набувають пірологічної стиглості й перетворюються на провідники горіння.

Обов'язково слід враховувати, що кількість і площа пожеж визначаються не лише погодними умовами, але й кількістю джерел вогню (пов'язаних із людським фактором та впливом військових дій). Тому в деяких випадках прогнозування точної кількості пожеж може бути просто неможливим (Sydorenko 2022; Almeida *et al.*, 2024).

Зважаючи на обмеження в моделюванні та значні рівні невизначеності, надалі дослідження мають бути сфокусовані більшою мірою не на моделюванні щільності пожеж і їхньої площі, а на прогнозуванні зміни пожежного середовища. Адже не лише середні показники зміни елементів клімату, а саме екстремальні відхилення показників пожежонебезпечної погоди визначатимуть негативні наслідки та площі пожеж під час пожежного сезону (Feyen *et al.*, 2020).

Висновки. Змодельовано сценарії зміни щільності та площі лісових пожеж, побудовані на основі аналізу регіональних кліматичних моделей. Результати цього аналізу є лише орієнтовними та можуть бути використані як додаткові аналітичні матеріали під час стратегічного планування протипожежних заходів у лісах на рівні адміністративних областей України, створення довгострокових регіональних програм і проєктів управління пожежами. Внаслідок зміни клімату ще більше збільшується загроза як виникнення лісових пожеж, так і збільшення їхніх масштабів у більшості регіонів України (особливо у південних та південно-східних регіонах), крім західних та північно західних, де пожежна небезпека суттєво не змінюватиметься у зв'язку із збільшенням кількості опадів.

Подяки. Автори висловлюють подяку анонімним рецензентам за цінні поради, корисні й конструктивні рекомендації та покращення тексту.

Джерела фінансування. Статтю підготовлено авторами в межах виконання тем досліджень УкрНДІЛГА (№ держреєстрації 0104U001926, № держреєстрації 0104U001926, № держреєстрації 0120U101893), замовником яких було Державне агентство лісових ресурсів України та НДР УкрГМІ № держреєстрації 0115U002776, яку виконували на замовлення Державної служби з надзвичайних ситуацій України.

ПОСИЛАННЯ – REFERENCES

- Adamenko, T.I., Kulbida, M.I. and Prokopenko, A.L. (2011) *Agroclimatic guide for the territory of Ukraine*. Kamianets-Podilskyi: PP Galahodza (in Ukrainian).
- Almeida, M., Soviev, M., San-Miguel, J., Durrant, T., Oom, D., Branco, A., Ferrari, D., Boca, R., Maianti, P., De Rigo, D., Suarez-Moreno, M., Roglia, E., Scionti, N., Broglia, M., Alves, D., Matos, C., Ribeiro, L.M., Viegas, D.X., Ribeiro, C., Rodrigues, T., Chuvieco, E., Oliva, P., Garcia, M., Velea, R., Laterza, R., De Lucia, M., Lorenzoni, P., Arca, B., Salis, M., Bacciu, V., Del Giudice, L., Pelizzaro, G., Duce, P., Marrs, C., Forkel, M., Beetz, K., Kosczor, E., Podebradska, M., Politi, N., Sfetsos, A., Vlachogiannis, D., Eftychidis, G., Stavrakoudis, D., Varela, V., Gitas, I.Z., Sjoström, J., Petřila, M., Lorent, A., Drobinkova, N., Vasilev, V., Tsvetkova, N., Yanko, B., Gospodinov, I., Zibtsev, S., Goldammer, J., Myroniuk, V., Sydorenko, S., Soshenskyi, O., Bogomolov, V. and

- Borsuk, O. (2024) *Report on the large wildfires of 2022 in Europe*, Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC138859. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/19760>
- Balabukh, V.O. and Zibtsev, S.V. (2016) 'Impact of climate change on quantity and area of forest fires in the northern part of the black sea region of Ukraine', *Ukrainian hydrometeorological journal*, 18, pp. 60–71 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>
- Chepur, S.S. (2015) *Biometrics: a methodical manual*. Uzhhorod: Vydavnytstvo UzhNU Hoverla (in Ukrainian).
- Cornes, R.C., van der Schrier, G., van den Besselaar, E.J.M. and Jones, P.D. (2018) 'An ensemble version of the E-OBS temperature and precipitation data sets', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(17), pp. 9391–9409. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>
- de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., Artés Vivancos, T. and San-Miguel-Ayanz, J. (2017) *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, ISBN: 978-92-79-77046-3. <https://doi.org/10.2760/13180>
- de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T. and San-Miguel-Ayanz, J. (2020) *European wildfire danger and vulnerability in a changing climate: towards integrating risk dimensions*. Luxembourg: Publications Office of the European Union. ISBN: 978-92-76-16898-0. <https://doi.org/10.2760/46951>
- Dosio, A. (2016) 'Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(10), pp. 5488–5511. <https://doi.org/10.1002/2015jd024411>
- Dosio, A., Paruolo, P. and Rojas, R. (2012) 'Bias correction of the ENSEMBLES high resolution climate change projections for use by impact models: analysis of the climate change signal', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117 (D17). <https://doi.org/10.1029/2012jd017968>
- Feyen, L., Ciscar Martinez, J., Gosling, S., Ibarreta Ruiz, D., Soria Ramirez, A., Dosio, A., Naumann, G., Russo, S., Formetta, G., Forzieri, G., Girardello, M., Spinoni, J., Mentaschi, L., Bisselink, B., Bernhard, J., Gelati, E., Adamovic, M., Guenther, S., De Roo, A., Cammalleri, C., Dottori, F., Bianchi, A., Alfieri, L., Voudoukas, M., Mongelli, I., Hinkel, J., Ward, P., Gomes Da Costa, H., De Rigo, D., Libertà, G., Durrant, T., San-Miguel-Ayanz, J., Barredo Cano, J., Mauri, A., Caudullo, G., Ceccherini, G., Beck, P., Cescatti, A., Hristov, J., Toreti, A., Perez Dominguez, I., Dentener, F., Fellmann, T., Elleby, C., Ceglar, A., Fumagalli, D., Niemeyer, S., Cerrani, I., Panarello, L., Bratu, M., Després, J., Szewczyk, W., Matei, N., Mulholland, E. and Olariaga-Guardiola, M. (2020) *Climate change impacts and adaptation in Europe*. JRC PESETA IV final report. EUR 30180 EN. Luxembourg: Publications Office of the European Union. JRC119178. ISBN 978-92-76-18123-1. <https://doi.org/10.2760/171121>
- Gao, J. (2017) *Downscaling Global Spatial Population Projections from 1/8-degree to 1-km Grid Cells*. NCAR Technical Notes NCAR/TN-537+STR. National Center for Atmospheric Research. <https://doi.org/10.5065/D60Z721H>
- Haylock, M.R., Hofstra, N., Klein Tank, A.M.G., Klok, E.J., Jones, P.D. and New, M.A. (2008) 'European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006', *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113. D20119+. <https://doi.org/10.1029/2008jd010201>
- Huppmann, D., Rogelj, J., Krey, V., Kriegler, E. and Riahi, K.A. (2018) 'New scenario resource for integrated 1.5°C research', *Nature Climate Change*, 8, pp. 1027–1030. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0317-4>
- Iturbide, M., Fernández, J., Gutiérrez, J.M., Bedia, J., Cimadevilla, E., Díez-Sierra, J., Manzanar, R., Casanueva, A., Baño-Medina, J., Milovac, J., Herrera, S., Cofiño, A.S., San Martín, D., García-Díez, M., Hauser, M., Huard, D. and Yeleki, Ö. (2021) *Repository supporting the implementation of FAIR principles in the IPCC-WGI Atlas*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3691645>
- Moss, R., Babiker, M., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., Elgizouli, I. and Zurek, M. (2008) *Towards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts, and Response Strategies*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. ISBN 978-92-9169-125-8
- Polevoy, A.N., Bozhko, L.E. and Barsukova, E.A. (2017) 'Impact of climate changes on agro-climatic indices of the vegetative period of main agricultural crops', *Ukrainian hydrometeorological journal*, 20, pp. 61–70 (in Ukrainian).
- Reid, A., Fuhlendorf, S. and Weir, J. (2010) 'Weather variables affecting Oklahoma wildfires', *Rangeland Ecology & Management*, 69(5), pp. 599–603. <https://doi.org/10.2111/REM-D-09-00132.1>
- Rules of fire safety in the forests of Ukraine* (2005). Order of the State Forestry Committee of Ukraine dated December 27, 2004, No. 278. *The Official Bulletin of Ukraine*, 13, p. 321 (in Ukrainian).
- Soshenskyi, O., Zibtsev, S., Tierientiev, A. and Vorotynskyi, O. (2021) 'Consequences of catastrophic landscape fires in Ukraine for forest ecosystems and population', *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 12(3), pp. 21–34. <https://doi.org/10.31548/forest2021.03.002>
- Stepanenko, S.M., Polovyi, A.M. and Shkolnyi, Ye.P. (2011) *Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine*. Odesa: Ekolohiya. ISBN 978-966-8740-83-1 (in Ukrainian).
- Sydorenko, S. (2022) 'Country report for Ukraine' in San-Miguel-Ayanz et al. (eds.) *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, pp. 110–115. JRC135226. <https://doi.org/10.2760/871593>
- Sydorenko, S.H. and Sydorenko, S.V. (2020) 'Analysis of fire risks in Ukrainian forests as a prerequisite for a national forest-fire zoning', *Forestry and Forest Melioration*, 137, pp. 91–101 (in Ukrainian). <https://doi.org/10.33220/1026-3365.137.2020.91>

- Sydorenko, S.G., Voron, V.P., Melnyk Ye.Ye., and Koval, I.M. (2021) *Forest fire zoning of forests of Ukraine*. Kharkiv: URIFFM (in Ukrainian).
- Xing, H., Fang, K., Yao, Q., Zhou, F., Ou, T., Liu, J., Zhou, S., Jiang, S., Chen, Y., Bai, M. and Ming Chen, J. (2023) 'Impacts of changes in climate extremes on wildfire occurrences in China', *Ecological Indicators*, 157, P. 111288. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111288>

ASSESSMENT OF POTENTIAL CHANGES IN THE FIRE DANGER IN THE UKRAINIAN FORESTS UNDER THE CLIMATE CHANGE

Sydorenko S.H.^{1*}, Balabukh V.O.², Melnyk Ye.Ye.³, Voron V.P.⁴, Koval I.M.⁵, Sydorenko S.V.⁶

The article presents an assessment of potential changes in fire danger in Ukrainian forests under climate change. To evaluate future changes in burnability and fire density, fire regimes and the spatial distribution of forest fires in previous years were taken into account. These data were used to assess the response of fire regimes to certain changes in climate over the baseline period (climatic norm), relative to which the projected changes for the periods 2021–2040, 2041–2060, and 2080–2100 have been predicted. All calculations were carried out at the administrative region level, and these data were grouped in the summary tables according to Ukraine's forest-growing zoning. Such data allowed for the modelling of scenarios for changes in forest fire density and area based on the analysis of regional climate change models. However, these scenarios are approximate and can be used as supplementary analytical materials during strategic planning of fire prevention measures in forests at the administrative region level in Ukraine, as well as for the development of long-term regional programs and fire management projects.

К е у в о р д с : forest fires, burnability of forests, fire density, climatic factors.

Одержано редколегією 30.09.2024

-
- ¹ Sydorenko Serhii, PhD (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Hryhoriia Skovorody Street 86, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: serhii88sido@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5972-0067>
- ² Balabukh Vira, PhD (Geographic Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Hydrometeorological Institute, Nauky Ave. 37, Kyiv, 03028, Ukraine. E-mail: balabukh@uhmi.org.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3223-7531>
- ³ Melnyk Yevhen, PhD. (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Hryhoriia Skovorody Street 86, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: wudckij1985@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9821-2751>
- ⁴ Voron Volodymyr, Doctor habil. (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Hryhoriia Skovorody Street 86, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: 52corvus@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-1059-3032>
- ⁵ Koval Iryna, Doctor habil. (Agricultural Sciences), Senior Researcher, Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Hryhoriia Skovorody Street 86, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: koval_iryana@ukr.net, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6328-1418>
- ⁶ Sydorenko Svitlana, PhD (Agricultural Sciences), Ukrainian Research Institute of Forestry and Forest Melioration named after G.M. Vysotsky, Hryhoriia Skovorody Street 86, Kharkiv, 61024, Ukraine. E-mail: svit23sydorenko@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1426-7614>
- * Correspondence: serhii88sido@gmail.com