

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

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

Оцінка та порівняльний аналіз пожежної небезпеки з використанням погодних індексів пожежної небезпеки

Ключові слова:

природні пожежі,
погодний індекс пожежної
небезпеки,
статистичний аналіз
характеристик пожежі,
кліматичні моделі,
супутникова інформація

Досліджено та статистично проаналізовано використання різних методів розрахунку погодних індексів пожежної небезпеки (FWI, ППН), які використовуються в Україні та Європейському Союзі для оцінки та прогнозу умов виникнення пожежної небезпеки за прогнозними та поточними метеорологічними даними відкритого доступу (проекти COPERNICUS, CORDEX, ERA5 та NASA). Зроблено порівняння розрахунків індексу FWI з використанням даних кліматичних моделей: CNRM-CM5 (Франція), MPI (Німеччина) та показників ППН В. Г. Нестерова та їхніх модифікацій, розрахованих авторською програмою на період 2006–2035 рр. За допомогою погодного індексу пожежної небезпеки FWI, що був розроблений та використовується в Канадській та Європейській системах прогнозування пожеж (CFFWIS, EFFIS), було обрано та статистично підтверджено найбільш адекватний варіант глобальної кліматичної моделі проекту CORDEX для періоду 2006–2035 рр. Проведено вибір найбільш успішної методики розрахунку модифікацій методу В. Г. Нестерова. У результаті такого порівняння було обрано методику Українського гідрометеорологічного інституту (автор В. О. Балабух), яка офіційно прийнята в Українському гідрометеоцентрі та була використана нами надалі для порівняльної оцінки з індексом пожежної небезпеки FWI із застосуванням різних наборів даних. Проаналізовано та статистично опрацьовано всі підготовлені дані за річною кількістю випадків з показниками класів пожежної небезпеки для трьох регіонів за 30 років за двома методами: методом Українського гідрометеорологічного інституту та методом Канадської служби прогнозів пожеж (CFFWIS). Результати порівняльного аналізу показують, що протягом 30-річного періоду (2006–2035 рр.) за умови використання прогностичних метеорологічних даних глобальної моделі MPI (ФРН) спостерігається поступове зростання річної кількості випадків із наявністю періодів різкого її збільшення або зменшення, визначених за результатами розрахунків двома методами. За даними показника FWI найбільші зміни очікуються в кількості діб помірного класу 3 пожежної небезпеки та вище — до 15–17 діб.

Вступ

Розробкою та уточненням критеріїв, що відображають імовірність виникнення пожеж, займаються багато дослідників [1–6]. Однак створити показник,

що ідеально відображав би фактичні умови виникнення пожеж, не вдається: по-перше, через різноманітність умов, властивих виникненню вогняної стихії, та поєднань різних факторів, що включає антропогенний; по-друге, через брак і велику дискрет-

© Т. Д. Лев, В. М. Піскун, І. П. Шедеменко, 2025. License CC BY 4.0

ність початкових даних спостережень різних природних параметрів. Метеорологічні умови належать до ключових факторів імовірності пожеж у природі. Вплив цих умов пожежної небезпеки оцінюється за допомогою метеорологічних параметрів, зокрема: індексу FWI (Fire Weather Index) — стандартизованого індексу пожежної небезпеки за погодними умовами, що об'єднує інформацію про місцеву температуру, швидкість вітру, відносну вологість повітря, опади, стан палива та поведінку пожежі [3]; а також погодного показника пожежної небезпеки (ППН) В. Г. Нестерова, що відображає баланс погодних факторів висушування та зволоження [6, 7]. Офіційно прийнятим в Українському гідрометеорологічному центрі є комплексний показник пожежної небезпеки (КПНУ, автор В. О. Балабух), в основу розрахунку якого покладено методику, розроблену В. Г. Нестеровим, з урахуванням уточнень щодо кількості опадів та швидкості вітру, характерних для різних регіонів України [8, 9].

За результатами досліджень пожежної небезпеки в Українському Поліссі за період 2006–2022 рр. [10] найбільший відсоток пожеж спостерігається на агроландшафтних територіях (від 60 до 90 %) у весняно-осінній період (тобто в періоди переходу від зими до весни та від літа до осені, що характеризуються нестійкими погодними умовами). Це пов'язано також із тим, що перед початком і після сільськогосподарських робіт здійснюється випалювання старої або вже непотрібної підсохлої трави. Пожежна небезпека від трав'яної рослинності визначається як властивостями самої трави, так і умовами погоди, які в певні періоди відіграють вирішальну роль в ініціюванні термінового розвитку пожеж. При цьому роль погодних умов зростає, оскільки вони впливають на ступінь висушування рослин, що вегетують, а також на швидкість поширення великими розмірами джерел горіння, здатністю змінювати напрямок та долати такі перешкоди, як дороги, водотоки та протипожежні мінералізовані смуги. Трава, як провідник горіння, швидше за іншу рослинність реагує на зміну кліматичних, сезонних та щоденних погодних умов (насамперед температури повітря та швидкості вітру). Як особливий вид палива вона є доступнішою для займання порівняно з горючими матеріалами, характерними для лісової, чагарникової або змішаної рослинності [1].

Метою цієї статті є порівняльний аналіз результатів методів розрахунку погодних індексів пожежної небезпеки (FWI та модифікованих показників

В. Г. Нестерова ППН та КПНУ); оцінка тенденції в багаторічній динаміці ходу цих індексів із використанням архівних даних ERA5 проекту Copernicus, даних проекту NASA та даних глобальних і регіональних прогностичних моделей клімату (проект CORDEX – Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) з оцінкою метеопараметрів до 2035 р. на території Українського Полісся.

З цією метою в роботі були поставлені такі завдання:

порівняти та виділити найбільш точну для території Полісся кліматичну модель розрахунку індексу FWI за величиною різниці між розрахованими значеннями погодних індексів за кліматичними моделями (CORDEX/GCM) та за даними повторного аналізу ERA5 за період 2006–2020 рр. відповідно до методики [3];

розрахувати модифікований індекс ППН та КПНУ за метеоданими NASA та за кліматичними моделями проекту CORDEX на період 2006–2035 рр. із використанням авторських програм;

провести статистичний аналіз індексів пожежної небезпеки, визначити особливості їхніх змін на досліджуваній території Полісся за кліматичними факторами.

Короткий опис та інформаційне забезпечення методів розрахунку погодних індексів пожежної небезпеки — FWI, ППН та КПНУ

Стандартизований індекс пожежної небезпеки FWI за погодними умовами, що був розроблений Канадською службою прогнозування пожеж, призначений для надання єдиної числової оцінки відносного потенціалу пожежі шляхом динамічного об'єднання інформації про місцеву температуру, швидкість вітру, відносну вологість повітря, опади та дані про вологість палива [3]. Прогнозні дані FWI використовуються щодня (а в деяких випадках і щогодини) усіма канадськими пожежними агентствами, її результати формують основу для опису пожежної обстановки, що змінюється. Система також використовується в країнах і регіонах за межами Канади, включаючи Європу, Нову Зеландію, Китай, США та ін. Для розрахунку індексу необхідні полуденні значення температури повітря, відносної вологості, швидкості вітру та накопичених за 24 год опадів. Ці вхідні дані об'єднуються за допомогою ряду емпіричних рівнянь, що оцінюють вплив вологості палива та вітру на основі різних факторів, пов'язаних із потенційною поведінкою поже-

жі [1, 11, 12]. Зокрема, враховується вологість різних шарів палива, вплив вітру на поширення пожежі та оцінка загальної кількості палива, яке доступне для спалювання.

Схема канадської системи прогнозування FWI для лісу (рис. 1) складається з шести компонентів, що враховують вплив вологості палива та погодних умов на поведінку пожежі [11, 12].

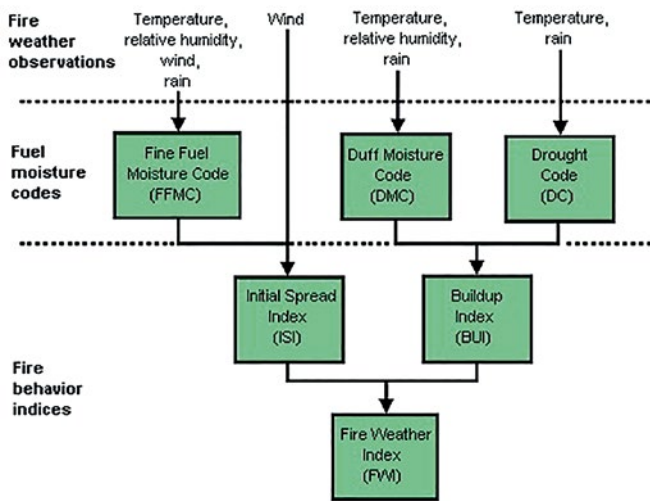


Рис. 1. Схема канадської системи прогнозування FWI [3]

Перші три компоненти (FFMC, DMC, DC) є кодами вологості палива, що ідентифіковані через числові оцінки вмісту води в лісовій підстилці та інших мертвих органічних речовинах, отриманих на основі емпіричного та експериментального матеріалу з використанням основних метеорологічних показників. Для кожного з трьох видів палива, що використовуються в системі FWI, був розроблений допоміжний підіндекс із двома фазами: одна для змочування дощем та одна для висихання. Ці підіндекси, які називаються кодами вологості палива, фактично є системами обліку — додають вологість після дощу і віднімають деяку частину для висихання щодня. Кожне паливо вважається висохлим експоненційно, тому його миттєва швидкість висихання пропорційна його поточному вмісту вільної води. Правильною мірою швидкості висихання є або тимчасовий лаг (тобто час втрати вільної води вище рівноважного значення), або нахил експоненційної кривої зміни вмісту вільної води за часом, який називається «швидкістю сушіння логарифму». Опишемо стисло представлені характеристики:

код вологості тонкодисперсного палива (FFMC) відображає вміст води в підстилці та дрібнозерни-

стому паливі товщиною 1–2 см; FFMC чутливий до щоденних змін температури, кількості опадів, відносної вологості та швидкості вітру;

код вологості Даффа (DMC) є показником вмісту води в пухкій органічній речовині, що розкладається, розміром 5–10 см; DMC чутливий до температури, опадів та відносної вологості;

код посухи (DC) є глибинним шаром ущільненої органічної речовини, 10–20 см, що визначає стійкість до гасіння. Код посухи DC чутливий до температури та опадів. Відставання за часом 52 доби.

Інші три компоненти (ISI, BUI, FWI) характеризують процес пожежі — швидкість поширення вогню, доступне для горіння паливо та інтенсивність фронтальної пожежі:

індекс початкового поширення (ISI) є числовою оцінкою поширення вогню відразу після загоряння без урахування впливу змінної кількості палива. Значення ISI залежать від швидкості вітру та часу доби. Індекс є комбінацією FFMC і вітру;

індекс накопичення (BUI) є показником загальної кількості палива, доступного для спалювання. За відсутності дощу BUI змінюється мало протягом дня. BUI є комбінацією DMC і DC;

погодний індекс пожежної небезпеки (FWI) відображає інтенсивність поширення пожежі. FWI є комбінацією ISI і BUI.

Оскільки канадська система прогнозування показників пожежної небезпеки FWI забезпечує безрозмірну числову оцінку потенціалу пожежі, що ґрунтується виключно на метеорологічних умовах, сприятливих для займання, поширення та підтримання пожежної небезпеки, то вона може бути використана не тільки для поточних, а й прогнозованих погодних умов.

Погодний індекс пожежної небезпеки В.Г. Нестерова ППН (КПО_N) являє собою кумулятивну суму добутків температури повітря на різницю між температурою повітря та точкою роси [6], що обчислюється для окремого пункту та конкретного часу за формулою

$$\text{КПО}_N = \text{КПО}_{N-1} \cdot K_{oc} + [t(t - t_d)]_N, \quad (1)$$

де КПО_N — значення КПО, що розраховується на поточний день, °C; КПО_{N-1} — значення КПО, що розраховується за попередній день, КПО_{N-1} = $t(t - t_d)$, °C; K_{oc} — коефіцієнт поправки на опади (рівний одиниці, якщо кількість опадів менше 3 мм, дорівнює нулю, якщо кількість опадів більше або дорівнює 3 мм); t — температура повітря о 12–15 год місцевого часу чи най-

ближчий до нього строк синхронних метеорологічних спостережень, °C; t_d — точка роси за той самий строк, °C; $(t - t_d)$ — дефіцит точки роси, °C.

Основним недоліком КПО є груба поправка на опади. У зв'язку з цим у 1976 р. Ленінградським науково-дослідним інститутом лісового господарства (ЛенНДІЛГ) уведено показник вологості надґрунтового покриву (ПВ1) з диференційованими поправками на опади, а також показник вологості лісової підстилки (ПВ2) [6, 7]. Обчислення цих показників починають з дня стійкого сходу снігового покриву (у цей день значення показників дорівнюють нулю) за формулою

$$(\text{ПВ1})_N = \{(\text{ПВ1})_{N-1} + [t(t - t_d)]_{N-1} \cdot K_{\text{оспв1}}\} N, \quad (2)$$

де $(\text{ПВ1})_N$ — значення (ПВ1), що розраховується на поточний день, °C; $(\text{ПВ1})_{N-1}$ — значення (ПВ1), що розраховується на попередній день, °C; $K_{\text{оспв1}}$ — коефіцієнт поправки на опади. Значення $K_{\text{оспв1}}$ визначаються в [4].

У 1990 р. М. А. Сафронов та А. В. Волокітіна модифікували КПО, доповнивши його поправкою на гігроскопічність мохів, лишайників, опадів та інших лісогорючих матеріалів (ЛГМ). Удосконалений індекс отримав назву показника вологості з урахуванням гігроскопічності (ПВГ).

Розрахунок ПВГ [7] здійснюється за формулою

$$(\text{ПВГ})_N = [(\text{ПВГ})_{N-1} + (t + 10)(t - t_d - 5)_N] \cdot (K_{\text{оспвг}})_N, \quad (3)$$

де $(\text{ПВГ})_N$ — значення ПВГ, що розраховується на поточний день, °C; $(\text{ПВГ})_{N-1}$ — значення ПВГ, що розраховується на попередній день, °C; $K_{\text{оспвг}}$ — коефіцієнт поправки на гігроскопічність.

Для розрахунку $K_{\text{оспвг}}$ використовуємо методику з урахуванням сумарної кількості опадів, яка наведена у [7].

В Україні комплексна методика оцінки природної пожежної небезпеки, що включає в себе оцінку напруженості природної пожежної небезпеки території та оцінку класу пожежної небезпеки за регіональними шкалами, може бути використана для виявлення територій постійної концентрації лісових пожеж та оптимізації системи протипожежного моніторингу [8]. Оцінку природної пожежної небезпеки за умов погоди запропоновано проводити за уточненим В. О. Балабух комплексним показником природної пожежної небезпеки за умов погоди (КПНУ) [9], який обчислюється за формулою

$$\text{КПНУ}_{n,i} = \text{КПНУ}_{(n-1),i} \cdot K_{\text{оп}}_{n,i} + K_{\text{в}}_{n,i} [t_{n,i}(t_{n,i} - t_{d,n,i})], \quad (4)$$

де $\text{КПНУ}_{n,i}$ — значення КПНУ за поточний день n в i -му пункті, °C; $\text{КПНУ}_{(n-1),i}$ — значення КПНУ за попередній день $(n-1)$ в i -му пункті; $K_{\text{оп}}_{n,i}$ — коригуючий коефіцієнт на кількість опадів в i -му пункті; $K_{\text{в}}_{n,i}$ — коригуючий коефіцієнт на максимальну швидкість вітру в i -му пункті; $t_{n,i}$ — температура повітря о 15 год місцевого часу за поточний день n в i -му пункті, °C; $t_{d,n,i}$ — температура точки роси за той же строк, °C; $(t_{n,i} - t_{d,n,i})$ — дефіцит точки роси за поточний день n в i -му пункті, °C.

Коригуючі коефіцієнти на кількість опадів та на максимальну швидкість вітру за добу в i -му пункті визначаються формулами в [9].

Територія дослідження та джерела інформації

Дослідження умов виникнення природних лісових пожеж проводяться для території радіоактивного забруднення Українського Полісся, у межах якої виділено шість регіонів відповідно до розташування метеостанцій наземної мережі спостережень УкрГідромету: регіон метеостанції м. Сарни Рівненської області; регіони м. Коростень, м. Овруч та м. Олевськ Житомирської області; регіони м. Чорнобиль та м. Тетерів Київської області (рис. 2).

За типом підстильної поверхні на території дослідження агроландшафти переважають у чотирьох регіонах: м. Коростень (85 % території агроландшафту і лише 14 % лісу), м. Сарни (60 % території агроландшафту і 36 % лісу), м. Олевськ (58 % території агроландшафту і 41 % лісу) і м. Тетерів (51 % території агроландшафту і 34 % лісу). Тільки в регіонах метеостанцій м. Чорнобиль і м. Овруч площа лісових масивів є більшою, співвідношення агроландшафту та територій з лісом відповідно у відсотках 40/51 та 42/56 [10].

Джерела інформації

Для вирішення поставлених завдань були використані наведені нижче джерела доступної інформації, які організовані до архівних або поточних баз даних за проектами.

Sopernicus — компонент спостереження Землі в рамках космічної програми Європейського Союзу, що надає дані: 1) значення показників пожежної небезпеки FWI (FWI_GCM, період 2006–2035 pp.), розрахованих за глобальними кліматичними моделями (GCM — Global Climatic Model) та за архівними даними реаналізу ERA5 (FWI_ERA5, період 2006–2020 pp.); 2) прогностичні метеорологічні дані,



Рис. 2. Територія дослідження з просторовим розподілом типів підстильної поверхні

отримані за трьома глобальними кліматичними моделями (EURO-CORDEX — Coordinated Downscaling Experiment — European Domain) для аналізу впливу кліматичних умов на характеристики лісових пожеж [13–15].

FIRMS — система інформації про пожежі для управління ресурсами NASA (<https://earthdata.nasa.gov/firms>), яка є частиною системи даних та інформаційної системи спостережень за Землею NASA (EOSDIS). Вона забезпечує архівними даними у форматах ГІС (*.shp) та Excel щодо фактів пожеж (осередків займання) з даними про потужність теплового випромінювання вогню (FRP) у мегаватах та температуру яскравості каналу вогняного пікселя (Brightness temperature) у кельвінах [16].

POWER (The Prediction of Worldwide Energy Resources — «Прогноз світових енергетичних ресурсів») надає сонячні та метеорологічні дані досліджень NASA для підтримки відновлюваних джерел енергії та містить поточні й архівні дані метеорологічних та агрометеорологічних спостережень на регулярній сітці (1×1 км) у форматах Excel та NetCDF [17].

Таким чином, доступна інформація була сформована у групи та наведена в табл. 1:

1) набір даних (FWI_GCM, період 2006–2035 pp.), містить прогнози показників пожежної небезпеки FWI для Європи в майбутніх кліматичних умовах (БД Projections);

2) набір даних (FWI_ERA5, період 2006–2022 pp.) забезпечує повну історичну реконструкцію метеорологічних умов, сприятливих для виникнення, поширення та стійкості пожеж; індекси пожежної небезпеки

розраховані за допомогою прогнозу погоди на основі історичного моделювання, наданого реаналізом ERA5 ECMWF;

3) набір метеорологічних даних (MeteoCordex, період 2006–2035 pp.), що побудований на комбінації двох кліматичних моделей — глобальної (GCM) та регіональної (RCM) — на рівні земної поверхні (2 м, 10 м);

4) набір поточної (Meteo_NASA, період 2006–2020 pp.) метеорологічної інформації (температура повітря, відносна вологість, кількість опадів, швидкість вітру), інтерпольованої у вузли регулярної сітки (1×1 км) та співвіднесені з метеостанціями регіонів;

5) набір даних характеристик пожеж (Fires-NASA, період 2006–2023 pp.), які отримані за допомогою спектральних радіометрів середньої роздільної здатності (MODIS) з платформ Terra і Aqua, а також радіометрів візуалізації видимого інфрачервоного діапазону (VIIRS) (роздільна здатність 375 м) з платформ Suomi NPP та NOAA-20.

Дані можуть використовуватися для аналізу та оцінки умов лісовідновлення територій після пожеж (температурно-водний режим на поверхні ґрунту та за шарами).

Погодний індекс пожежної небезпеки FWI розраховано з використанням різних моделей даних — ERA5, NASA, MeteoCORDEX (рис. 3).

Кліматичні моделі проекту MeteoCORDEX були розроблені в рамках ініціативи EURO-CORDEX, що забезпечує високу роздільну здатність вихідних даних моделей, орієнтованих на європейський регіон. Щоб оцінити вплив зміни клімату, модель GEF

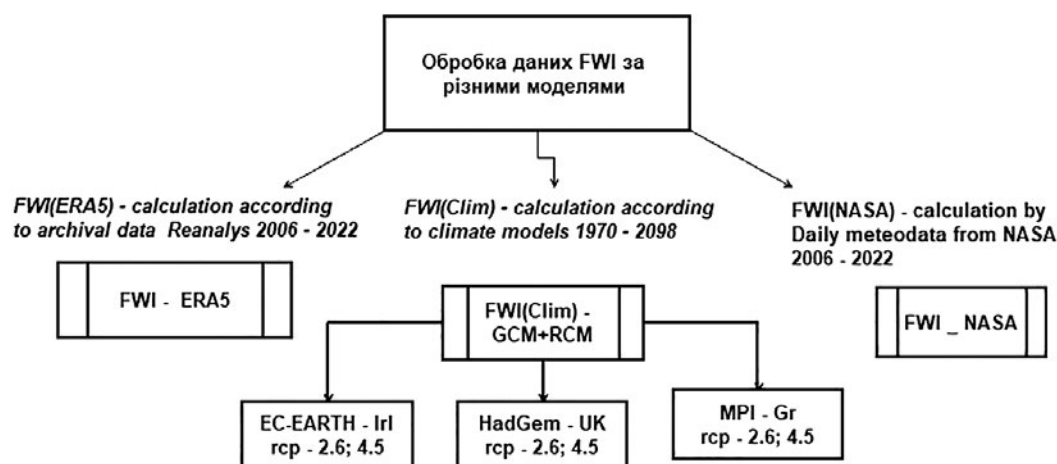


Рис. 3. Схема обробки даних FWI за різними проєктами

(Global ECMWF Fire Forecasting model — Глобальна модель прогнозування пожеж Європейського центру середньострокових прогнозів погоди) запускається для чотирьох різних кліматичних сценаріїв: поточного клімату (позначеного як «історичний») та трьох сценаріїв репрезентативної траєкторії концентрації RCP (Representative Concentration Pathway), що відповідають оптимістичному сценарію викидів, при якому викиди починають знижуватися після 2020 р. (RCP 2.6); сценарій, за яким викиди починають знижуватися після 2040 р. (RCP 4.5) та песимістичний сценарій, у якому викиди продовжують зростати протягом століття (RCP 8.5). Історичні симуляції за період 1970–2005 рр. забезпечують основу для прогнозів індексу FWI.

Вихідні дані кліматичних моделей (див. табл. 1) для регіону Європи (рис. 4) у вигляді матриці $424 \times$

$\times 412 \times 365$ осередків з кроком $0,11 \times 0,11^\circ$ для одного параметра FWI за кожен день по всіх станціях оброблялися для проведення фізико-статистичного порівняльного аналізу з метою вибору найбільш репрезентативної моделі розрахунку показника погодної пожежонебезпеки (FWI). Для порівняльного аналізу двох погодних індикаторів (FWI та ППН) з використанням авторських програм проведено такі обчислення:

розрахунок показників: ППН за метеорологічними даними архіву проєкту NASA та FWI за даними проєктів NASA і ERA5 за період 2006–2020 рр.;

розрахунок на період 2006–2035 рр. показника ППН за даними кліматичних моделей METEO_CORDEX та порівняння результатів розрахунку з показником FWI, обчисленим за аналогічними метеоданими.

Таблиця 1. Джерела інформації, що використовуються в дослідженні, на період 2006–2035 рр.

1) FWI_GCM	2) FWI_ERA5	3) MeteoCordex	4) Meteo_NASA	5) Fires-NASA
БД «Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projections»: 1. ICHEC-EC-EARTH/RCA4 2. MPI-ESM-LR_rcp2.6_fwi-daily 3. HadGem2 rcp 2.6 fwi-daily	БД «Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service»: CFS* FWI Rating System використання прогнозу погоди з реаналізу ECMWF ERA5	БД «Regional climate models data on single levels»: 1. ICHEC-EC-EARTH/RCA4 2. MPI-ESM-LR (Germany) 3. HadGEM2-ES (UK)	БД «Meteorological parameters», отримані з: https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/	БД «NASA FIRMS» є частиною LANCE (Land, Atmosphere Near real-time Capability for EOS) (EOSDIS): 1. MODIS Collection 6.1, 2. VIIRS S-NPP, 3. VIIRS NOAA-20

* Canadian Forest Service FWI Rating System — рейтингова система FWI Канадської лісової служби

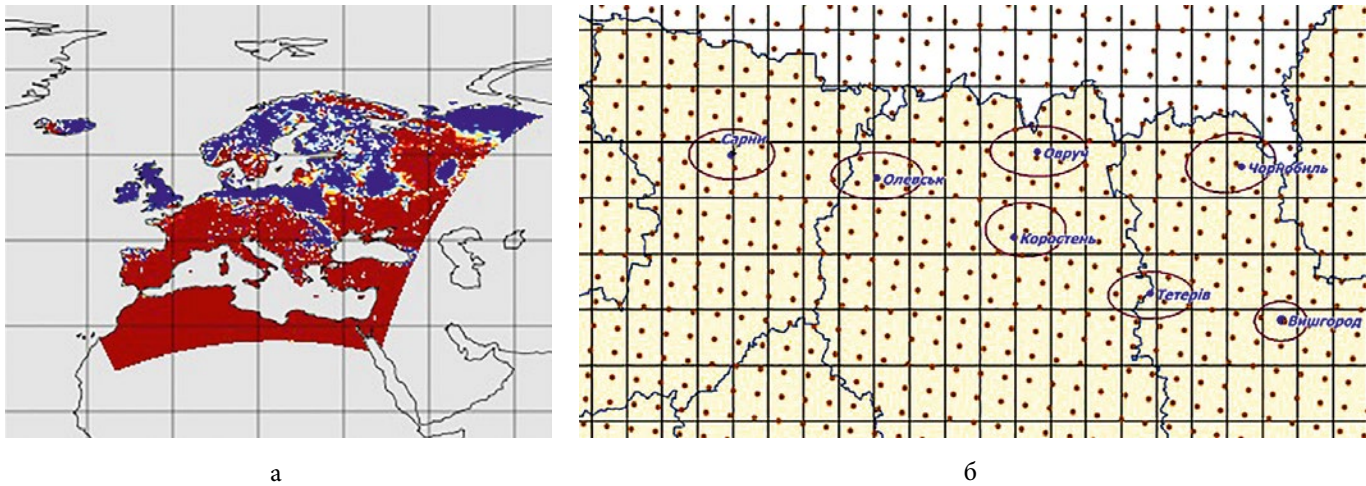


Рис. 4. Регіон Європи (а) і територія дослідження з координатними сітками проектів ERA5 та NASA (б)

Порівняльний аналіз погодних показників пожежної небезпеки — FWI та ППН, що використовуються для оцінки класу пожежної небезпеки

Алгоритм порівняльного аналізу значень погодних показників пожежної небезпеки FWI та ППН, що отримані за різними моделями та методиками, був проведений відповідно до алгоритму, який наведено на рис. 5 і включає таку послідовність семи кроків:

1 — читання із сайту проекту Copernicus даних FWI за трьома вибраними глобальними кліматичними моделями (див. рис. 3) та архівними даними Reanalysis ERA5; формування даних за регіонами та періодами;

2 — обчислення погодного показника FWI за поточними та архівними даними NASA відповідно до методології GEFF [12] за період 2006–2020 рр.;

3 — порівняльний аналіз значень FWI, отриманих за різними кліматичними моделями, згідно з методикою [3], для вибору найбільш адекватної та точнішої моделі розрахунку FWI для території дослідження;

4 — обчислення погодного показника ППН за даними архівної інформації ERA5 та обраної прогностичної кліматичної моделі MPI-ESM-LR (MPI, Germany);

5 — оцінка класів пожежної небезпеки за обчисленими значеннями FWI та ППН та їхній порівняльний аналіз для всіх випадків періоду 2006–2020 рр.;

6 — вибір випадків із пожежами для обраних регіонів за період 2006–2020 рр. Обчислення середньомісячної та середньорічної кількості днів із пожежами та кількості загорянь (площ пожеж) за регіонами;

7 — статистичний аналіз значень показників по-

жежної небезпеки за всією вибіркою та окремо для випадків із пожежами; розподіл класів підвищеної пожежної небезпеки за архівними (ERA5, NASA) та за прогностичними даними глобальної кліматичної моделі MPI-ESM-LR на період до 2035 р.

Порівняльна оцінка значень індексу пожежонебезпеки FWI за архівними даними ERA5 із FWI за даними кліматичних моделей (METEO_COEDEX) та NASA (кроки 1–3 алгоритму на рис. 5)

Відхилення значень FWI за метеоданими кліматичних моделей GCM та NASA від значень FWI реаналізу ERA5 обчислювалися відповідно до методології [3] за такими формулами:

$$\Delta FWI_{GCM} = FWI_{GCM} - FWI_{ERA5}, \quad (5)$$

$$\Delta FWI_{NASA} = FWI_{NASA} - FWI_{ERA5}, \quad (6)$$

де FWI_{GCM} — значення індексу за глобальними кліматичними моделями; FWI_{NASA} — значення індексу за даними NASA; FWI_{ERA5} — значення індексу, отримане з реаналізу ECMWF ERA5. Такий метод порівняння правомірний лише для FWI, а не для інших індикаторів.

Набір метеоданих моделі реаналізу ERA5 ґрунтується на даних наземної мережі спостережень, що використовували індекс FWI_{ERA5} для порівняння значень FWI під час вибору прогностичної кліматичної моделі, яка є найбільш придатною для території Полісся. Статистичне порівняння у [18] набору даних реаналізу ERA5 та набору даних вимірювань на

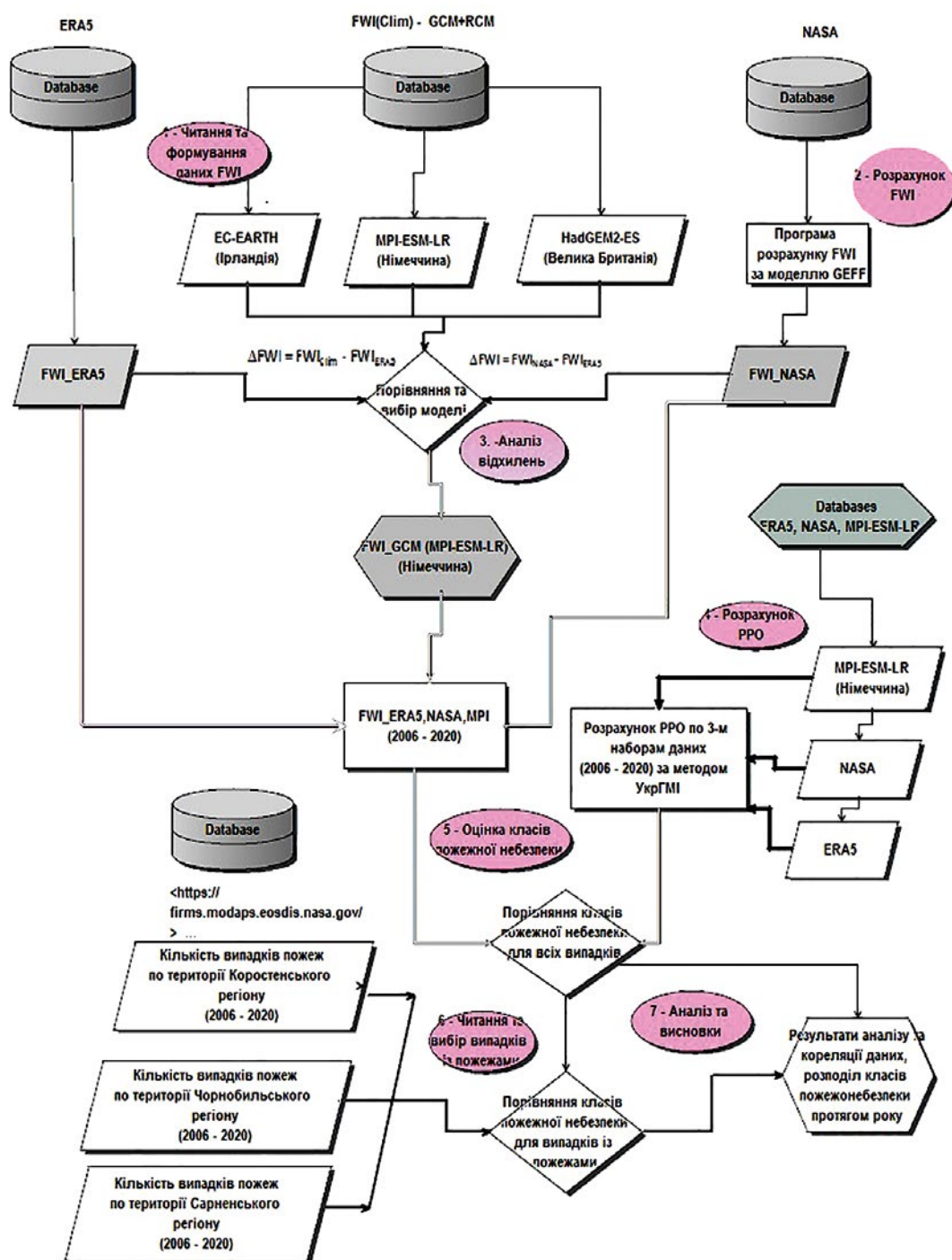


Рис. 5. Схема алгоритму порівняльного аналізу двох методів обчислення погодних показників пожежної небезпеки ППН та FWI

178 метеостанціях по всій території України засвідчило їхню прийнятну відповідність. Висновок авторів у [18, 19] ґрунтується на розгляді основних кліматичних показників добового масштабу (атмосферні опади, мінімальна, середня та максимальна температура повітря) за період спостережень 1946–2020 рр.

Статистика порівняння FWI виконана за щоденними даними семи метеостанцій Полісся за період 2006–2020 рр., результати наведено в табл. 2. Додатково для порівняння наведена статистика FWI з ансамблю моделей GCM (середнє арифметичне за вказаними трьома кліматичними моделями) [18–20].

Таблиця 2. Статистика порівняння щоденних показників пожежонебезпеки (FWI) за даними глобальних кліматичних моделей GCM (FWIGCM) та за даними NASA (FWINASA) із даними моделі реаналізу погоди ERA5 (FWIERA5), середніх по території дослідження за період 2006–2020 рр.

Параметр	Глобальна кліматична модель (GCM), сценарій RCP2.6				NASA
	MPI-ESM-LR (Німеччина)	EC-EARTH (Ірландія)	HadGEM2-ES (Великобританія)	Ансамбль GCM	
Довжина ряду	38 353	38 353	37 723	38 353	32 874
Середнє ΔFWI , $P = 95\%$	$-1,7 \pm 0,1$	$-1,5 \pm 0,1$	$1,1 \pm 0,1$	$-0,7 \pm 0,1$	$-3,1 \pm 0,1$
Мінімальне	-57,2	-57,6	-57,6	-57,5	-55,7
Максимальне	110,6	96,7	99,8	50,7	14,9
Медіана	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,6
Стандартне відхилення	12,0	10,2	13,1	9,7	5,5
Коефіцієнт кореляції Спірмена	0,41	0,42	0,43	0,56	0,90

Примітка. Довжина ряду дорівнює числу діб у періоді $\times$ кількість станцій.

Порівняльний аналіз показує хорошу узгодженість показників FWI за метеоданими моделі реаналізу ERA5 та даними спостережень NASA — значення коефіцієнта кореляції Спірмена для пари FWI_{NASA} і FWI_{ERA5} дорівнює 0,90, що характеризує високий рівень зв'язку між FWI за цими наборами даних. У середньому FWI за даними NASA занижують показники FWI порівняно з ERA5.

За частотним аналізом (рис. 6) у 93 % випадків FWI_{NASA} має від'ємні значення, а величина відхилень ΔFWI_{NASA} у 78 % випадків не перевищує 5 одиниць

(перебуває в інтервалі значень від -5 до +5) та у 91 % випадків не перевищує 10 одиниць.

Середні значення відхилень ΔFWI , обчислені за даними трьох глобальних кліматичних моделей (див. рис. 6), практично не відрізняються. У більшості випадків (від 55 до 65 %) виконується умова $\Delta FWI > 0$, а діапазон відхилень від FWI_{ERA5} можливий від -50 до +90 одиниць. Найбільші відхилення спостерігалися в окремі роки у серпні та вересні, коли значення FWI за даними окремих GCM були значно вищими за FWI_{ERA5} , а у квітні і травні нижчими. За розглянутий

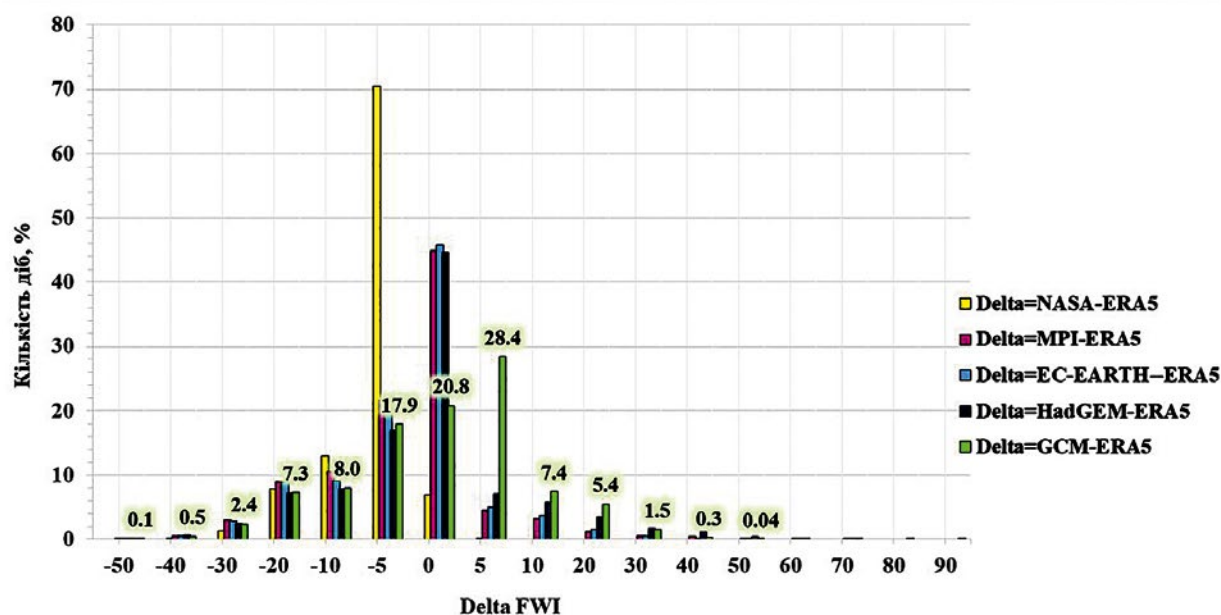


Рис. 6. Частотний (%) розподіл ΔFWI — величини відмінностей FWI за даними NASA, глобальних кліматичних моделей та їхнього ансамблю від FWI за даними ERA5 за період 2006–2020 рр.

період 2006–2020 рр. різниця між значеннями FWI, обчисленими за даними глобальних кліматичних моделей і моделі ERA5, у 61–66 % діб не перевищує 5 одиниць, у 76–81 % — 10 одиниць FWI. Відносно найкращі результати отримано для MPI-ESM-LR (MPI, Німеччина).

Якщо для розрахунку показника FWI використовувати ансамбль глобальних кліматичних моделей, то діапазон значень $\Delta FWI_{GCM} = FWI_{GCM} - FWI_{ERA5}$ зменшується порівняно з ΔFWI окремих моделей, змінюючись у межах від -50 до 60 одиниць. Цифрами на рис. 6 позначено ΔFWI_{GCM} ансамблю. За іншими показниками переваг використання ансамблю моделей не виявлено. Кількість діб із ΔFWI у градації від 0 до 5 одиниць скорочується з 45 до 21 %. Кількість діб з ΔFWI у градації від 5 до 10 одиниць збільшується з 5–7 %, для окремих моделей до 28 % для ансамблевого ΔFWI_{GCM} .

Аналіз динаміки середньомісячних та середньорічних значень FWI за період 2006–2020 рр.

На рис. 7 наведено середньобогаторічний річний хід середньомісячних значень показника FWI, розрахованих за кліматичними моделями HadGEM2-ES (Велика Британія), EC-EARTH (Ірландія), MPI-ESM-LR (Німеччина), за архівними даними реаналізу ERA5 (EFES) та за даними NASA.

Усереднені середньомісячні дані FWI (див. рис. 7) показують:

за даними моделі HadGEM2-ES (Велика Британія) порівняно зі значеннями FWI, отриманими за архівними даними ERA5 та за даними NASA, спостерігаються підвищені значення в окремі періоди, осо-

бливо в максимальний період пожежної активності (липень — вересень);

за всіма моделями максимум FWI припадає на серпень, за винятком показника FWI за даними ERA5 (максимум у червні та серпні);

найбільші значення показника FWI властиві для територій із луговою та сільськогосподарською рослинністю;

за величиною показника FWI та річним ходом середньомісячних FWI найбільш близькі моделі — ERA5, NASA, MPI-ESM-LR, EC-EARTH;

модель HadGEM2-ES дає завищені у 2,0–2,5 раза значення показника FWI у період максимальної пожежної небезпеки.

Середньорічну динаміку значень FWI на період 2006–2035 рр. за даними MPI-ESM-LR і за період 2006–2020 рр. відповідно до даних ERA5 і NASA наведено на рис. 8. Проведено розрахунок прогнозованих значень FWI до 2030 р. із використанням середньорічних даних FWI (джерела — ERA5 і NASA) за період 2006–2020 рр. та апроксимацію цього ряду лінійним трендом з побудовою рівняння прямої ($y = 0,22x + 4,4$). Точність лінійної апроксимації (середнє квадратичне відхилення фактичних значень від прогнозованих) для цієї вибірки становить $\pm 1,05$. Таким чином, прогнозований діапазон значень FWI розраховується з урахуванням точності моделі. На достовірність прогнозу впливає довжина вихідного ряду та відстань до прогнозованого року. Прогноз за лінійною моделлю розраховується, як правило, на третину довжини вихідного ряду.

Графіки лінійної апроксимації (див. рис. 8) динаміки середньорічних значень FWI за даними MPI, ERA5 і NASA показують, що прогнозні значення FWI за даними MPI, ERA5 та NASA наближаються один

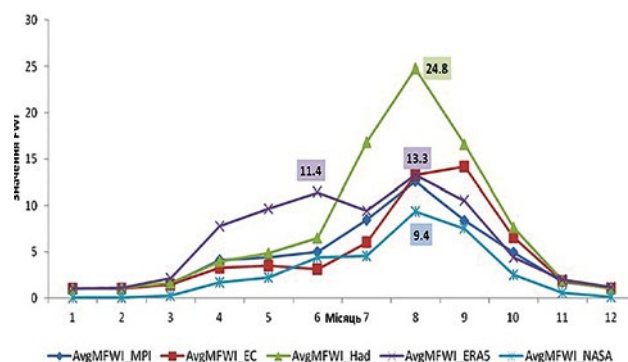


Рис. 7. Річний хід середньомісячних значень FWI за даними MPI-ESM-LR, EC-EARTH, HadGEM2-ES, ERA5, NASA

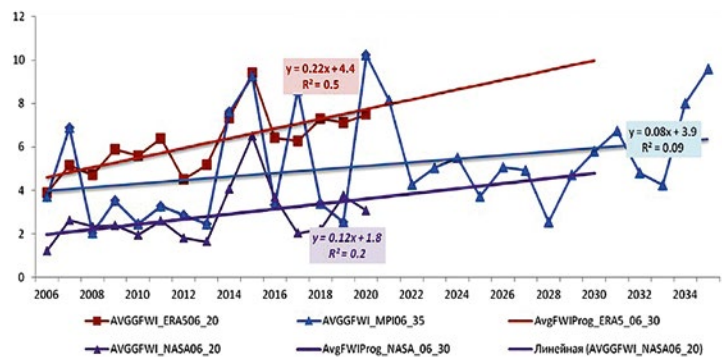


Рис. 8. Динаміка середньорічних значень FWI за даними ERA5, MPI-ESM-LR, NASA на період 2006–2035 рр.

до одного і показують підвищення середньорічних значень FWI на наступні роки. Достовірність лінійної апроксимації значень FWI за даними ERA5 є вищою, ніж для MPI та NASA.

Таким чином, ґрунтуючись на отриманих результатах щодо порівняльного аналізу розрахунків FWI, авторами був обраний варіант моделі — MPI-ESM-LR (Німеччина), результати якої будуть використані надалі під час порівняльного аналізу погодних індикаторів — FWI та ППН.

Розрахунок ППН та оцінка методів розрахунку погодного індексу ППН та вибір оптимального

Проведено розрахунки погодного індексу пожежної небезпеки ППН В.Г. Нестерова [5] та його модифікацій [6, 7] за допомогою авторської програми за період 2006–2020 рр. за архівними даними ERA5, поточними даними NASA та даними кліматичної моделі MPI-ESM-LR (MPI). Нами було відібрано три типові регіони метеостанцій: м. Коростень — агроландшафтна територія, м. Сарни — ліс та агроландшафт, м. Чорнобиль — ліс. Отримані результати було проаналізовано за запропонованим алгоритмом:

порівняння середньомісячних і середньорічних значень показника ППН (рис. 9) для трьох регіонів за чотирма методиками за формулами (1–4);

аналіз річного ходу середньомісячних значень ППН за 30 років (2006–2035 рр.) за прогностичними даними моделі MPI (ФРН) для трьох регіонів (Чорнобиль, Коростень та Сарни);

порівняння ходу динаміки середньорічних та середньомісячних даних ППН та FWI.

Результати порівняльного аналізу середньомісячних значень за 15-річний період (див. рис. 9, а)

показують, що методика розрахунку з урахуванням гігроскопічної вологості мохів (ПВГ_м, формула 3) не підходить для території Українського Полісся — значення здебільшого негативні внаслідок достатньої вологості атмосферного повітря на території, що розглядається. Тож у подальших міркуваннях ми виключимо цю методику.

Наведений річний перебіг середньомісячних значень ППН показує, що протягом року спостерігаються два максимуми значень ППН — у весняний період (травень) та у літньо-осінній період (серпень та вересень) за всіма трьома методиками. Найбільш близькі середньомісячні дані розраховані за методиками В.Г. Нестерова та В.О. Балабух. Таким чином, у подальшій порівняльній оцінці буде використано лише погодний показник пожежної небезпеки ППН, розрахований за методом В.О. Балабух, прийнятий до оперативного використання в Українському гідрометеорологічному центрі.

Порівняльна характеристика річного ходу середньомісячних та середньорічних значень FWI та ППН за моделями даних (NASA, ERA5, MPI) наведена на рис. 10 і показує однотипність ходу середньомісячних значень ППН та FWI, розрахованих різними моделями. Зазначається підвищення прогнозованих погодних індексів, яке починається з четвертого місяця року (квітня) з максимумом у серпні та вересні, що відповідає фактичним даним (див. рис. 9, а).

Верифікація даних погодних індексів, розрахованих за різними методами, з фактичними даними про пожежі

Якщо ми додатково проаналізуємо прогностичні розрахунки ППН та FWI за вказаними методами та моделями даних із фактичними даними про середню

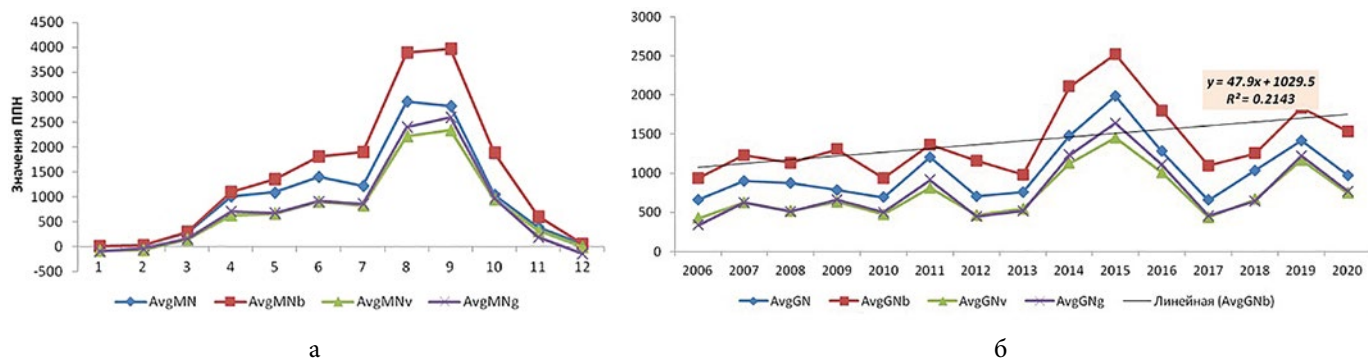


Рис. 9. Динаміка річного ходу середньомісячних значень ППН у регіонах метеостанцій (а) за чотирма методиками та динаміка середньорічних значень ППН (б)

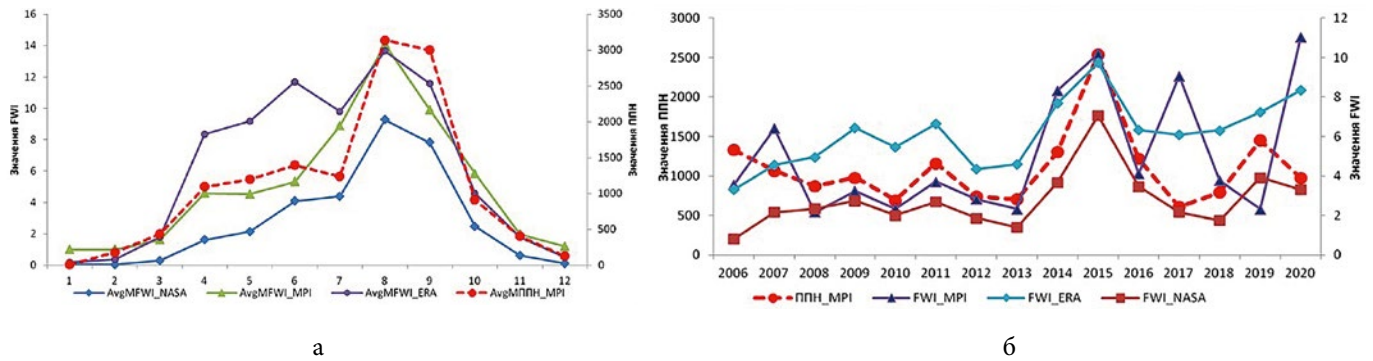


Рис. 10. Динаміка річного ходу середньомісячних значень (а) та динаміка середньорічних значень (б) погодних показників пожежної небезпеки ППН та FWI за кліматичними моделями

кількість днів із пожежами по місяцях, то максимуми кількості днів та максимуми значень ППН та FWI припадають на літньо-осінній період (серпень і жовтень). Фактично ми спостерігаємо два максимуми пожежної ситуації — березень і квітень та серпень і жовтень. Більше корелює кількість пожеж восени з динамікою погодних показників пожежної небезпеки ППН та FWI_ERA5 (0,87–0,89). Залежність від погодних умов у середньому є досить високою в ці місяці.

На рис. 11 наведено порівняльний аналіз фактичних та прогностичних (з використанням лінійних трендових моделей) середньомісячних та середньорічних значень ППН та FWI з фактичними даними про кількість днів із пожежами. Згідно з фактичними даними про середньомісячну кількість днів із пожежами по території агроландшафтів (м. Коростень) спостерігається два максимуми: березень і квітень із максимумом у квітні, а також серпень і жовтень із максимумом у серпні (див. рис. 11, а). Максимальні середньомісячні дані ППН відзначені для цієї території у травні, серпні та вересні. За величинами ППН (>3000) ці випадки належать до класів високої пожеж-

ної небезпеки за погодними умовами (табл. 3). За прогностичними метеоданими йде повільне збільшення значень FWI (AvgFWI_ByMod), досягаючи максимуму в серпні (14,9 – градація помірної пожежної небезпеки для погодного індикатора FWI). Динаміка середньорічних значень ППН та FWI на рис. 11, б показує тренд на збільшення всіх трьох характеристик пожежної небезпеки – кількості днів на місяць із пожежами та величин погодних індексів (ППН та FWI) з прийнятною достовірністю апроксимації (0,22–0,49).

Динаміка середньорічного ходу розрахованих FWI та ППН відповідає динаміці річного ходу кількості днів із пожежами на цій території. Використовуючи лінійний тренд динамік річного ходу показників FWI_ERA5 і ППН та середню кількість днів із пожежами, можна відзначити, що кількість днів із пожежами на найближчі п'ять років зростатиме (28 випадків/рік) відповідно до зростання погодних показників FWI (0,22 од./рік) та ППН (50 од./рік).

Наступним кроком у порівняльній оцінці погодних показників відповідно до алгоритму, наведеного на рис. 5, є кроки 5 і 6 (оцінка класів пожежної небезпеки).

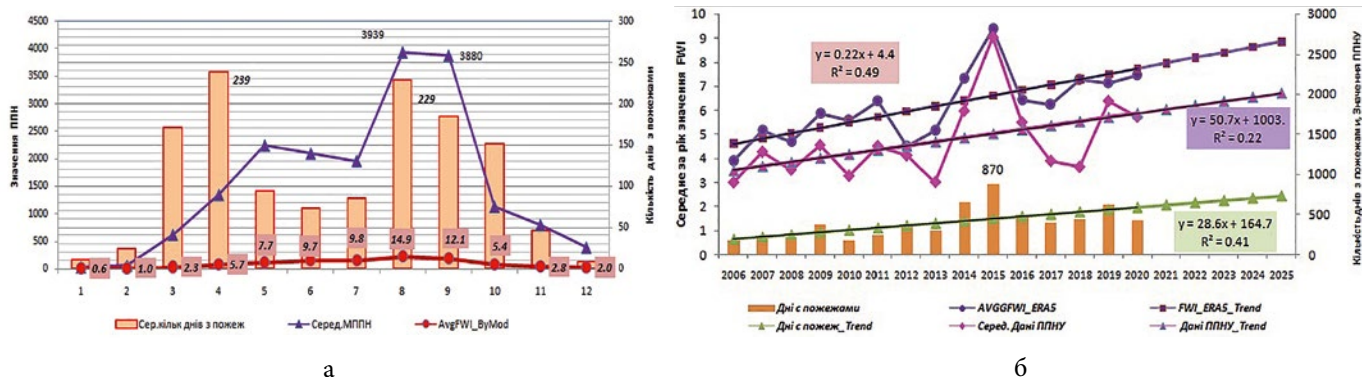


Рис. 11. Річна динаміка середньомісячних значень (СередМППН) FWI_ERA5 і ППН та кількості днів із пожежами за місяцями в період 2006–2020 рр. для регіону м. Коростень (а); середньопрогностичні розрахунки FWI та дані ППН з фактичними даними про середню кількість днів із пожежами по роках (б)

Порівняльна оцінка класів пожежної небезпеки за погодними індексами FWI і ППН (кроки 5 і 6)

Порівняльний аналіз погодного індексу пожежної небезпеки ППН В. О. Балабух із Канадським індексом пожежної небезпеки FWI проводився з використанням таблиці відповідності градацій рівнів показників та класу пожежної небезпеки (див. табл. 3).

Класи пожежної небезпеки лісів визначаються залежно від лісорослинних умов та погодних факторів. Наявні національні системи оцінки пожежної небезпеки розроблялися з урахуванням конкретних природних умов та займистості певної території і не можуть бути автоматично перенесені на будь-яку місцевість [21]. В Україні використовується індексна система оцінки пожежної небезпеки в лісах, яка базується на врахуванні погодних умов та стану рослинності — ступеня пожежної небезпеки в лісах з урахуванням місцевих особливостей. Комплексний показник, що визначається за допомогою цієї системи, дає змогу оцінити ступінь пожежної небезпеки. Для характеристики ступеня пожежної небезпеки весь діапазон значень показника ППН поділено на п'ять класів пожежної небезпеки (див. табл. 3), які змінюються від класу 1 «безпеки немає» ($ППН \leq 400$) до класу 5 «надзвичайного» ($ППН > 5000$) [22].

Для подальшого аналізу запропонованих методик розрахунку ППН і FWI проведемо розрахунок кількості діб із різними класами пожежної небезпеки: визначимо клас пожежонебезпечності та проведемо підрахунок кількості випадків для класів 1–5 з використанням табл. 3 за двома періодами; 2006–2020 рр. і 2021–2035 рр., середніх для трьох пунктів (м. Чорнобиль, м. Сарни, м. Коростень) за архівними метеорологічними даними NASA, ERA5 та прогностичними метеоданими MPI. Отримані результати буде

проаналізовано й наведено у вигляді узагальнених статистичних характеристик.

Розраховано річну кількість діб з показниками пожежної небезпеки індексу FWI, ППН (В. О. Балабух) для всіх класів пожежної небезпеки за глобально-регіональною кліматичною моделлю MPI-ESM-LR-RCP 2.6. і за даними ERA5 і NASA. Результати наведено у вигляді порівняльних таблиць кількості класів показників пожежної небезпеки ППН і FWI (у відсотках від загальної кількості випадків), що були розраховані з використанням прогностичних метеорологічних даних різними методами: архівними даними реаналізу ERA5, NASA і глобальної моделі MPI (табл. 4 і 5).

Аналіз результатів, наведений у табл. 4 і 5, показує:

1. Кількість випадків (%) за перші 15 років із показниками пожежної небезпеки, що розраховані за двома моделями даних (NASA, ERA5), рівномірно розподілено за класами небезпеки для методу ППН, а для показника FWI майже вдвічі збільшено число випадків класу 1 порівняно з ППН. Лінійний тренд для цього періоду показує, що відбувається збільшення випадків із пожежною небезпекою класу 2 і вище як для показника FWI, так і для ППН у середньому на 2–3 % щороку для всіх регіонів. Ці дані корелюють із даними про кількість випадків із пожежами на цій території за цей же період 2006–2022 рр. (див. рис. 11, 6).

2. Протягом 30-річного періоду (2006–2035 рр.) під час використання прогностичних метеорологічних даних, отриманих за глобальною моделлю MPI (ФРН), річна кількість випадків із показниками пожежної небезпеки лінійно збільшується зі швидкістю один і більше випадків на рік. Цей висновок зроблено згідно з даними табл. 4 та 5 і стосується двох методів — ППН (В. О. Балабух) та FWI (EFFIS).

Таблиця 3. Таблиця відповідності градацій індексів пожежної небезпеки ППН та FWI

Клас пожежної небезпеки	Градації рівнів показника пожежної небезпеки			
	ППН		FWI	
1	≤ 400	небезпеки немає	$< 5,2$	дуже низький
2	401–1000	низький	5,2–11,2	низький
3	1001–3000	помірний	11,2–21,3	помірний
4	3001–5000	високий	21,3–38,0	високий
5	> 5000	надзвичайний	38,0–50,0	дуже високий
			$\geq 50,0$	екстремальний

Таблиця 4. Середня кількість випадків класів пожежної погодної небезпеки за показниками FWI та ППН, за даними MPI, NASA, ERA5 за періоди 2006–2020 рр. та на 2006–2035 рр.

Показник	Модель	Період	Клас 1	Клас 2	Клас 3	Клас 4	Клас 5
FWI	NASA	2006–2020	81	11	6	2	–
FWI	ERA5	2006–2020	66	15	13	6	1
ППН	NASA	2006–2020	38	14	28	11	9
FWI	MPI	2006–2035	74	13	7	4	2
ППН	MPI	2006–2035	73	23	3,9	0.1	–

Таблиця 5. Розподіл класів пожежної небезпеки ≥ 2 , ≥ 3 , $\geq 4 + 5$ показників FWI та ППН за метеоданими погодних джерел: MPI, NASA, ERA5

Показник	Модель	Період	Клас ≥ 2 , %	Клас ≥ 3 , %	Клас $\geq 4+5$, %
FWI	MPI	2006–2035	26	12	5
ППН	MPI	2006–2035	27	4	–
FWI	NASA	2006–2020	18	8	1
ППН	NASA	2006–2020	62	48	20
FWI	ERA5	2006–2020	34	20	7

Висновки

Проведено порівняльний аналіз погодних показників пожежної небезпеки – FWI та ППН, що використовуються для оцінки класу пожежної небезпеки за різними моделями та джерелами доступної інформації (Copernicus, FIRMS, POWER), які організовані до архівних або поточних баз даних. Проаналізовано та статистично опрацьовано всі підготовлені дані за річною кількістю випадків з показниками пожежної небезпеки для трьох регіонів за 30 років за двома методами: метод Українського гідрометеорологічного інституту (автор В. О. Балабух), в основі якого лежить метод В. Г. Нестерова, та метод Канадської служби прогнозів пожеж (EFFIS). Результати порівняльного аналізу показують, що протягом 30-річного періоду (2006–2035 рр.) за використання прогностичних метеорологічних даних, отриманих за глобальною моделлю MPI (ФРН), йде поступове збільшення річної кількості випадків із періодами їх різкого збільшення або зменшення, розрахованих двома методами. До 2035 р. за погодними показниками FWI і ППН тривалість пожежонебезпечного сезону за прогностичними даними глобальної кліматичної моделі MPI 2.6 збільшиться на 6–7 діб, у середньому до 100 діб на рік з рівнем пожежної небезпеки класу 2 і вище. За даними показника FWI найбільші зміни очікуються в кількості діб класу 3 пожежної небезпеки і вище — до 15–17 діб.

Збільшення періоду прогнозу зменшує достовірність результатів, оскільки вихідними даними для методів, що використовуються, є прогностичні глобальні моделі, які не адаптовані для території дослідження. Бажано використовувати моделі прогнозування, що адаптовані до території, враховувати локальні географічні умови та сучасні кліматичні показники гідротермічного режиму цієї території. Статистичний аналіз підтверджує достовірність отриманих результатів, і запропоновані методи оцінки пожежної небезпеки з використанням погодних показників (FWI та ППН) мають право на існування та на спільне використання, оскільки випадки з класами низької небезпеки щодо розподілу річної кількості випадків прогноуються з незначними відмінностями порівняно з класами підвищеної небезпеки. Більш детальне порівняння необхідно провести із залученням фактичних даних про пожежі різних категорій небезпеки.

Список використаної літератури

1. Ходаков В. Е. Лесные пожары: методы исследования // В. Е. Ходаков, М. В. Жарикова. – Херсон : Гринь Д. С., 2011. – 470 с.
2. Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty. EUR28926 EN, JRC108974 / D. Rigo, G. Liberta, T. Houston Durrant [et al.]. – 2017. – Publications Office of the European Union, Luxembourg. – doi.org/10.2760/13180.

3. European Fire Danger Application: Product User Guide. Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2. climate.copernicus.eu.
4. Звіт про науково-дослідну роботу «Прогнозування наслідків впливу природних пожеж на лісові екосистеми та ступеня їх відновлення на радіоактивно забруднених територіях України на основі сучасних фізико-математичних та геоінформаційних методів» (проміжний). Науковий керівник НДР д-р техн. наук М. М. Талерко.
5. Глаголев В. А. Проектирование геоинформационной системы прогноза возникновения и распространения травяных пожаров / В. А. Глаголев, Р. М. Коган // Региональные проблемы. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 47–53.
6. Губенко И. М. Сравнительный анализ методов расчета индексов пожарной опасности / И. М. Губенко, К. Г. Рубинштейн // Тр. ГМЦ. – 2012. – № 347. – С. 207–222.
7. 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.
8. Звіт про науково-дослідну роботу «Розроблення системи моніторингу та прогнозування метеорологічних умов, що визначають природну пожежну небезпеку в Україні». Науковий керівник НДР В. О. Балабух. – УкрДГМІ ДСНС України, 2017.
9. Балабух В. О. Комплексна методика оцінки та прогнозування природної пожежної небезпеки за метеорологічними умовами. УкрДГМІ ДСНС України.
10. Комплексний аналіз характеристик лісових пожеж та метеорологічних умов, що впливають на їхнє розповсюдження, на території Українського Полісся за період 2006–2022 рр. / Т. Д. Лев, В. М. Піскун, Ю. В. Яценко, І. П. Шедemenko // Ядерна енергетика та довкілля. – 2024. – Вип. 3 (31). – С. 49–68.
11. Van Wagner C. E. The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System: Tech. Rep. 35 / C. E. Van Wagner. – Ottawa, Ont. : Canadian Forestry Service, 1987. – 37 p.
12. Van Wagner C. E. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System / C. E. Van Wagner, T. L. Pickett. – Ottawa, ON: Canadian Forest Service, 1985. – 20 p. – (Forestry Technical Report 33).
13. ERA5-based global meteorological wildfire danger maps / C. Vitolo, F. Di Giuseppe, C. Barnard [et al.] // Scientific Data. – 2020. – Vol. 7. – P. 216. – doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z.
14. Lawson B. D. Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System / B. D. Lawson, O. B. Armitage. – Edmonton, AB: Natural Resources Canada, Canadian Forest Service, Northern Forestry Centre, 2008. – 84 p.
15. Copernicus Climate Change Service. Climate Data Store: Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projections. – 2020. – doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
16. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). MODIS / Aqua+Terra Thermal Anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data). – doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
17. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). – Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.
18. Observation-based gridded daily climate data for Ukraine, 1946–2020 / V. Osadchyi, O. Skrynyk, V. Sidenko [et al.] // Geoscience Data Journal. – 2025. – Vol. 12 (2). – e70000. – doi.org/10.1002/gdj3.70000.
19. Krakovska S. Overall climate change impact assessment for Ukraine (Узагальнена оцінка впливу зміни клімату в Україні): technical report / S. Krakovska, L. Kryshtop. – 2024. – Project implemented by Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH on behalf of the German Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action (BMWK) under the International Climate Initiative (IKI).
20. Development and evaluation of a North America ensemble wildfire air quality forecast: Initial application to the 2020 Western United States “Gigafire” / P. Makkaron, D. Q. Tong, Y. Li [et al.] // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2023. – Vol. 128. – e2022JD037298. – doi.org/10.1029/2022JD037298.
21. Зубарева А. М. Методы оценки пожарной опасности растительных горючих материалов / А. М. Зубарева // Региональные проблемы. – 2018. – Т. 21, № 2. – С. 92–96. – doi.org/10.31433/1605-220X-2018-21-2-92-96.
22. Сверлова Л. И. Метод оценки пожарной опасности в лесах по условиям погоды с учетом поясов атмосферной засушливости и сезонов года / Л. И. Сверлова. – Хабаровск, 2000. – 46 с.

T. D. Lev, V. M. Piskun, I. P. Shedemenko

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

Assessment and Consistent Analysis of Fire Risk Based on the FWI Weather Index

A study and statistical analysis have been conducted on the use of various methods for calculating fire hazard

weather indices (FWI, PPN) applied in Ukraine and the EU to assess and forecast fire hazard conditions based on open-access forecast and real-time meteorological data (COPERNICUS, CORDEX, ERA5, and NASA projects). The calculations of the FWI index were compared using data from climate models: CNRM-CM5 (France), MPI (Germany) and PPN indicators by V.G. Nesterov and its modifications, calculated by the author's program for the period 2006–2035. Using the fire weather index (FWI), which was developed and is used in the Canadian and European fire forecast systems (CFFWIS, EFFIS), the most adequate global climate model version of the CORDEX project for the period 2006–2035 was selected and statistically confirmed. The most successful calculation methodology of the V.G. Nesterov method was selected. As a result of this comparison, the method (author V.A. Balabukh) was selected, officially adopted by the Ukrainian Hydrometeorological Center and used by us in the future for comparative assessment with the FWI — Fire Weather Index using different data sets. All prepared data on the annual number of cases with fire hazard class indicators for 3 regions for 30 years were analyzed and statistically processed by two methods: the UkrHMI method (author V.A. Balabukh), which is based on the V.G. Nesterov method, and the method of the Canadian Fire Forecast Service (EF). The results of the comparative analysis show that over a thirty-year period (2006–2035), using predictive meteorological data obtained using the global MPI model (FRN), there is a gradual increase in the annual number of cases with periods of a sharp increase or decrease in the annual number of cases calculated by the two methods.

Keywords: natural fires, fire hazard index, statistical analysis of fire characteristics, climate models, satellite information.

References

1. Khodakov V.E., Zharikova M.V. (2011). *Lesnye pozhary: metody issledovaniia* [Forest Fires: Research Methods]. Kherson: Grin D.S., 470 p. (in Rus.)
2. 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*. EUR28926 EN, JRC108974. Luxembourg: Publications Office of the European Union. doi.org/10.2760/13180.
3. European Fire Danger Application. *Product User Guide*. Official reference number service contract: 2018/C3S_422_Lot2_TEC/SC2.climate.copernicus.eu.
4. Report on the research work “Predicting the consequences of the impact of natural fires on forest ecosystems and the degree of their restoration in radioactively contaminated territories of Ukraine based on modern physical, mathematical and geoinformation methods” (interim). Scientific supervisor of the research work is Dr. of Tech. Sciences M.M. Talerko. (in Ukr.)
5. Glagolev V.A., Kogan R.M. (2016). Proektirovanie geoinformatsionnoy sistemy prognoza vozniknoveniya i rasprostraneniya travyanykh pozharov [Design of a geoinformation system for forecasting the occurrence and spread of grass fires]. *Regionalnye problemy* [Regional Problems], vol. 19 (2), pp. 47–53. (in Rus.)
6. Gubenko I.M., Rubinshteyn K.G. (2012). Sravnitelnyy analiz metodov rascheta indeksov pozharney opasnosti [Comparative analysis of methods for calculating fire danger indices]. *Trudy Gidrometeorologicheskogo Tsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia], vol. 347, pp. 207–222. (in Rus.)
7. Sofronov M.A., Sofronova T.M., Volokitina, A.V. (2004). Otsenka pozharney opasnosti po usloviyam pogody s ispolzovaniem meteoprognozov [Assessment of fire danger based on weather conditions using meteorological forecasts]. *Lesnoe khozyaystvo*, vol. 6, pp. 31–32. Available at: http://forest.akadem.ru/Articles/04/sofronov_1.pdf (in Rus.).
8. Balabukh, V.O. (Ed.). (2017). *Zvit pro naukovu-doslidnu robotu “Rozroblennia systemy monitorynhu ta prohnozuvannia meteorolohichnykh umov, shcho vyznachaiut pryrodnu pozhezhnu nebezpeku v Ukraini”* [Research report: Development of a monitoring and forecasting system of meteorological conditions determining natural fire danger in Ukraine]. Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine. (in Ukr.)
9. Balabukh V.O. *Kompleksna metodyka otsinky ta prohnozuvannia pryrodnoi pozhezhnoi nebezpeky za meteorolohichnymi umovamy* [Comprehensive methodology for assessment and forecasting of natural fire danger based on meteorological conditions]. Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine. (in Ukr.)
10. Lev T.D., Piskun V.M., Yatsenko Yu.V., Shedemenko I.P. (2024). Kompleksnyi analiz kharakterystyk lisovykh pozhezh ta meteorolohichnykh umov, shcho vplyvaiut na yikhnie rozpovsiudzhennia, na terytorii Ukrainiskoho Polissia za period 2006–2022 rr. [Comprehensive analysis of forest fire characteristics and meteorological conditions affecting their spread in the Ukrainian Polissia for 2006–2022]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 3 (31), pp. 49–68. (in Ukr.)
11. Van Wagner C.E. (1987). *The development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System* (Technical Report No. 35). Canadian Forestry Service.
12. Van Wagner C.E., Pickett T.L. (1985). *Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather In-*

- dex System* (Forestry Technical Report No. 33). Canadian Forest Service.
13. Vitolo, C., Di Giuseppe, F., Barnard, C., et al. (2020). ERA5-based global meteorological wildfire danger maps. *Scientific Data*, 7, 216. doi.org/10.1038/s41597-020-0554-z.
 14. 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.
 15. Copernicus Climate Change Service (2020). *Climate Data Store: Fire danger indicators for Europe from 1970 to 2098 derived from climate projections*. doi.org/10.24381/cds.ca755de7.
 16. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). *MODIS / Aqua+Terra thermal anomalies / Fire locations 1 km FIRMS V0061 NRT (Vector data)*. doi.org/10.5067/FIRMS/MODIS/MCD14DL.NRT.0061.
 17. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER). Available at: <https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer>.
 18. Osadchyi V., Skrynyk O., Sidenko V., Aguilar E., Guizarro J., Szentimrey T., Skrynyk O., Bihari Z., Palamarchuk L., Oshurok D., Kravchenko I., Pinchuk D. (2025). Observation-based gridded daily climate data for Ukraine, 1946-2020. *Geoscience Data Journal*, vol. 12 (2), e70000. doi.org/10.1002/gdj3.70000.
 19. Krakovska S., Kryshchuk L. (2024). *Overall climate change impact assessment for Ukraine: Technical report*. Project implemented by Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH under the International Climate Initiative (IKI).
 20. Makkaroon P., Tong D. Q., Li Y., Hyer E. J., Xian P., Kondragunta S., Campbell P. C., Tang Y., Baker B. D., Cohen M. D., Darmanov A., Lyapustin A., Saylor R. D., Wang Y., Stajner I. (2023). Development and evaluation of a North America ensemble wildfire air quality forecast: Initial application to the 2020 Western United States "GigaFire". *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 128, e2022JD037298. doi.org/10.1029/2022JD037298.
 21. Zubareva A. M. (2018). Metody otsenki pozharnoy opasnosti rastitelnykh goryuchikh materialov. *Regionalnye problemy* [Methods for assessing the fire hazard of combustible plant materials], vol. 21 (2), pp. 92–96. doi.org/10.31433/1605-220Kh-2018-21-2-92-96. (in Rus.)
 22. Sverlova L. I. (2000). *Metod otsenki pozharnoy opasnosti v lesakh po usloviyam pogody s uchetom poyasov atmosfery zasushlivosti i sezonov goda* [Method for assessing forest fire danger based on weather conditions, taking into account atmospheric aridity zones and seasons of the year]. Khabarovsk, 46 p. (in Rus.)

Надійшла / Received 28.10.2025

Рекомендована до друку / Accepted 10.11.2025