МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА ШЕВЧЕНКА

ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТЕОРОЛОГІЇ ТА КЛІМАТОЛОГІЇ

На правах рукопису

УДК_____

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПОГОДИ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Галузь знань ***10 – Природничі науки***
Спеціальність ***103 – Науки про Землю***
Освітня программа ***Метеорологія***

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4-го курсу
освітнього рівня бакалавр
Сундукова Мартіна Едуардовича

Науковий керівник:
Яценко Юлія Володимирівна,
асистет кафедри
метеорології та кліматології

Допустити до захисту:

Завідувач кафедри метеорології та кліматології, проф.Сергій СНІЖКО

«__»_____ 2025 р.

КИЇВ – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП……..……..…….

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТА ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕКИ…...

1.1 Фізико-географічні умови території Чорнобильської зони відчуження …...

1.2 Кліматичні умови території Чорнобильської зони відчуження…….....

1.3 Рослинний покрив і лісові екосистеми як фактори пожежного ризику

1.4 Радіоекологічні аспекти лісових пожеж у ЧЗВ

РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ПОЖЕЖОНЕБЕЗПЕЧНИХ УМОВ ПОГОДИ……

2.1 Поняття та класифікація пожежонебезпечних умов погоди……

2.2 Метеорологічні чинники та синоптичні умови, що впливають на пожежну небезпеку в екосистемах……..

2.3 Індекси та методи оцінки пожежної небезпеки……..

2.4 Характеристика використаних даних ……..

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ТА ОЦІНКА ПОКАЗНИКА ПОЖЕЖНОЇ НЕБЕЗПЕКИ ППН В .Г. НЕСТЕРОВА ТА ЙОГО МОДИФІКАЦІЙ ЗА ДАНИМИ КЛІМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ CORDEX/GCM. ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ППН ТА FWI. ……..……..……

3.1 Методики розрахунку показника пожежної небезпеки В .Г. Нестерова та його модифікацій …….…….

3.2 Порівняльна оцінка середньомісячних значень та динаміка річного ходу середньомісячних значень ППН за період 2006 – 2020 рр.……

3.3 Порівняльний аналіз показника пожежної небезпеки ППН В.Г.Нестерова та його модифікацій з Канадським індексом пожежної небезпеки FWI, розрахованими за даними глобальної кліматичної моделі MPI-M-MPI-E#SM-LR/RCA4……

ВИСНОВКИ……..…….

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ…….……...……

ВСТУП

Лісові пожежі є однією з найнебезпечніших форм природних лих, що завдають серйозної шкоди довкіллю, економіці та здоров'ю населення. Зі зростанням частоти та інтенсивності таких пожеж унаслідок глобальних кліматичних змін зростає й актуальність досліджень, спрямованих на їх моніторинг, оцінку та прогнозування. Особливо гостро ця проблема постає в межах Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) — унікального за своїм екологічним і радіоекологічним статусом регіону, де лісові та трав'яні пожежі можуть спричинити не лише знищення природних ресурсів, але й повторне радіоактивне забруднення територій.

Чорнобильська зона відчуження є складним природно-техногенним об'єктом, де поєднуються численні ризики: щільна лісова рослинність, відсутність активного господарського контролю, велика кількість мертвих деревостанів і висока концентрація радіонуклідів у ґрунті та рослинному покриві. В умовах підвищеної пожежної небезпеки навіть локальні загоряння можуть призвести до значних екологічних і соціальних наслідків. У цьому контексті важливого значення набуває вдосконалення системи оцінювання пожежонебезпечних погодних умов на основі сучасних індексів і кліматичних моделей.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю розробки та адаптації надійних індексів оцінки пожежної небезпеки до природних умов Поліського регіону України, зокрема — до умов ЧЗВ. Серед існуючих індексів важливу роль відіграє показник пожежної небезпеки за метеоумовами (ППН), розроблений В. Г. Нестеровим, та його сучасні модифікації, а також міжнародний індекс FWI (FireWeatherIndex), який широко застосовується у світовій практиці.

Метою даної роботи є аналіз, розрахунок і порівняльна оцінка індексів пожежної небезпеки ППН (у тому числі його модифікацій) та FWI для умов Чорнобильської зони відчуження, з урахуванням сучасних кліматичних моделей та архівних метеорологічних даних.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

1. Охарактеризувати фізико-географічні, кліматичні та екологічні умови ЧЗВ як регіону з підвищеним ризиком ландшафтних пожеж.
2. Розглянути теоретичні засади формування пожежонебезпечних умов погоди та чинники, що впливають на ризик загорянь.
3. Проаналізувати методики розрахунку ППН за В. Г. Нестеровим та його модифікаціями, а також FWI.
4. Виконати розрахунки та порівняння індексів пожежної небезпеки за даними кліматичних моделей CORDEX/GCM (ERA5, MPI).
5. Оцінити динаміку змін кількості днів за класами пожежної небезпеки у періодах 2006–2020 та 2021–2035 років.

Об’єктом дослідження є природно-кліматичні та екосистемні умови Чорнобильської зони відчуження як фактори формування пожежної небезпеки.

Предмет дослідження — погодні індекси оцінки пожежної небезпеки (ППН, FWI) та їх адаптивне використання у контексті локальних умов ЧЗВ.

Наукова новизна роботи полягає в застосуванні порівняльного підходу до аналізу індексів ППН і FWI на основі різних кліматичних моделей і у визначенні найбільш релевантних інструментів для моніторингу пожежонебезпечних погодних умов у специфічному середовищі Чорнобильської зони.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані для вдосконалення системи пожежного

моніторингу, підготовки рекомендацій для екологічних служб, рятувальних структур і науково-дослідних інституцій, які працюють у сфері управління ризиками в зоні відчуження.

Розділ 1. Загальна характеристика Чорнобильської зони відчуження як об’єкта пожежонебезпеки

1.1. Фізико-географічні умови території Чорнобильської зони відчуження

Фізико-географічні умови Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) є сукупністю природних характеристик — геоморфологічних, гідрологічних, кліматичних, ґрунтових та біогеоценотичних — що визначають особливості території з точки зору її екологічного функціонування, уразливості до впливів та, зокрема, пожежонебезпеки. У цьому підрозділі буде проведено системний огляд основних природних компонентів ЧЗВ, які мають значення для моніторингу та оцінки пожежного ризику.

Географічне положення. Зона відчуження розташована у північній частині Київської області, в межах Поліської фізико-географічної провінції. Це зона перехідного типу між лісовою та лісостеповою зонами, що обумовлює її високу екосистемну різноманітність. Зона займає близько 2600 км², межує з Республікою Білорусь та має умовно обмежений доступ для населення.

Рельєф. Зона лежить на межі Східноєвропейської рівнини, її рельєф характеризується переважно рівнинною формою з незначними коливаннями висот (від 100 до 170 м над рівнем моря). Місцями трапляються слаборозчленовані моренні гряди, дюнні піски, залишки зандрових рівнин. Така морфологія не створює природних бар’єрів для поширення пожеж і дозволяє вогню охоплювати великі площі за умови наявності сприятливих погодних умов.

Гідрографія. Через ЧЗВ протікає річка Прип’ять — одна з найбільших приток Дніпра — разом із притоками Уж, Ілля, Тетерів. Також присутня велика кількість боліт, озер і меліоративних каналів. Частина боліт є евтрофними, що сприяє утворенню торфовищ. Однак значна частина водних

об’єктів осушена внаслідок меліорації, проведеної у 1960–1980-х роках. Сучасне падіння рівня ґрунтових вод та кліматичне потепління призвели до втрати природного гідрологічного буфера, що сприяє утворенню осередків займань.

Ґрунти. Переважають дерново-підзолисті, супіщані та піщані ґрунти з низьким вмістом гумусу, невисокою водоутримуючою здатністю та слабкою структурою. Їх швидке пересихання в умовах тривалої спеки робить такі ґрунти сприятливими для загорянь навіть без участі поверхневого рослинного шару. Особливу небезпеку становлять торфові ґрунти — при пересиханні вони можуть самозайматися і тліти тижнями, вивільняючи значну кількість шкідливих речовин.

Рослинність. Вегетаційне покриття ЧЗВ відображає пострадіаційну сукцесію — на місці покинутих полів та населених пунктів сформувалися вторинні лісостани. Переважають соснові ліси (Pinussylvestris), які формують легко займисту хвойну підстилку. Серед деревних порід також трапляються береза повисла (Betulapendula), вільха чорна (Alnusglutinosa), дуб звичайний (Quercusrobur), ялина європейська (Piceaabies). Трав’яний покрив у багатьох місцях утворює безперервний сухий настил із лугових та бур’янових видів.

Болота і торфовища. За класифікацією природних ландшафтів, ЧЗВ має до 25 % площ із заболоченими ділянками. Унаслідок осушення частина з них трансформувалася в пожежонебезпечні торфовища. Їхня небезпека полягає не лише у високому потенціалі займання, а й у можливості повторного вивільнення радіонуклідів, накопичених у торфовому горизонті.

Ландшафтна структура. Територія є мозаїчною, поєднує ліси, болота, відкриті ділянки, заростаючі поля, штучні та деградовані елементи. Така гетерогенність ускладнює прогнозування поширення вогню, однак у поєднанні з картографічними даними дозволяє моделювати вогненебезпечні сценарії за допомогою геоінформаційних технологій.

Таким чином, фізико-географічні умови ЧЗВ є критично важливими для розуміння її пожежної небезпеки. Наявність пожежонебезпечних типів рослинності, слабоструктурованих ґрунтів, висока фрагментованість ландшафту та деградовані гідрологічні системи створюють передумови для формування складних і важко прогнозованих пожеж. Для ефективного моніторингу пожежонебезпеки необхідно враховувати всі компоненти природного середовища.

Фізико-географічні умови Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) є складним поєднанням природних компонентів, які суттєво впливають на динаміку екосистем та ступінь їхньої пожежонебезпеки. Зона розташована у межах північного Полісся України та включає мозаїчну структуру ландшафтів, представлену переважно хвойними та мішаними лісами, болотами, луками, річками, а також антропогенно зміненими територіями.

Пожежі у 1992, 2010, 2015 та 2020 роках стали прикладами високого ризику для екосистем ЧЗВ. Вони охоплювали тисячі гектарів і супроводжувалися викидом радіоактивних речовин у повітря. Найбільша пожежа 2020 року охопила понад 66 тисяч гектарів, спричинила зростання рівнів забруднення повітря в Києві та інших містах. Аналіз таких випадків підтверджує необхідність удосконалення моніторингу, управління ризиками та превентивних заходів.

1.2 Кліматичні умови території Чорнобильської зони відчуження

Чорнобильська зона відчуження розташована у межах північної частини Київської області та характеризується помірно-континентальним кліматом, що відзначається досить чітко вираженими сезонами. Кліматичні умови мають важливе значення в контексті пожежонебезпечності, адже саме

вони значною мірою визначають інтенсивність та динаміку формування лісових пожеж.

Зона перебуває під впливом повітряних мас помірних широт, однак останні десятиріччя характеризуються змінами кліматичних умов, зокрема підвищенням середньорічної температури повітря, зміною кількісного і якісного режиму опадів, зростанням тривалості періодів із посушливою погодою. Всі ці зміни сприяють збільшенню частоти й інтенсивності пожеж, а також ускладнюють їх прогнозування та гасіння.

Середньорічна температура повітря в регіоні коливається від +7 °C до +8 °C. У найтеплішому місяці, липні, середньомісячна температура становить +18…+20 °C, а в найхолоднішому, січні, вона опускається до –5…–7 °C. Упродовж останніх 20 років помічено стабільну тенденцію до потепління, яка проявляється як у зростанні середньої температури, так і в збільшенні кількості днів із температурою понад +30 °C.

Річна сума атмосферних опадів складає приблизно 550–700 мм, причому найбільша кількість опадів припадає на літній та осінній періоди. Однак через зміну клімату спостерігається зростання кількості днів без опадів, особливо у весняно-літній період, що призводить до висушування лісової підстилки, мохів, трав’яного покриву та створює передумови для швидкого розповсюдження вогню.

Вологість повітря в літній період часто знижується до 30 % і нижче, що є критичним показником для горючості рослинного матеріалу. У поєднанні з підвищеною температурою та сильним вітром це створює вибухонебезпечні умови, за яких навіть іскра або блискавка можуть стати джерелом займання. У ЧЗВ фіксується активна трансформація гідрологічного режиму: через осушення ґрунтів, зміну водного балансу та зниження рівня підґрунтових вод територія стає ще більш уразливою до впливу вогню.

Окремої уваги заслуговують вітрові умови. Середньорічна швидкість вітру коливається у межах 3–5 м/с. У весняно-літній період можливі шквали з поривами до 15–20 м/с, що значно ускладнює ситуацію з пожежами, адже сприяє швидкому поширенню полум’я на великі площі, у тому числі — через переміщення жарин та іскор.

У поєднанні з наявністю великої кількості сухого органічного матеріалу (сухостій, лісова підстилка, опале листя, хвоя), високий рівень сонячної радіації та температури створюють стабільно високу пожежонебезпеку протягом більшої частини року.

Умовно пожежонебезпечний період поділяється на весняний (березень–травень), коли масово спалюється суха трава, і літній (червень–серпень), коли основною причиною виникнення пожеж є екстремальні температури, блискавки або антропогенний фактор.

Кліматичні умови ЧЗВ, з урахуванням впливу радіаційного фону, значною мірою посилюють небезпеку: навіть незначні пожежі можуть викликати викид радіонуклідів у повітря та спричинити транскордонне перенесення радіоактивних речовин. Саме тому важливим завданням залишається створення системи попередження, яка базується на постійному аналізі та прогнозуванні кліматичних параметрів території.

1.3 Рослинний покрив і лісові екосистеми як фактори пожежного ризику

Структура рослинного покриву Чорнобильської зони відчуження. Чорнобильська зона відчуження охоплює понад 2600 км², значна частина якої покрита лісами, що зросли як природним, так і штучним шляхом. У після аварійний період територія зазнала активної ренатуралізації, адже традиційно господарська діяльність була припинена. Покинуті сільськогосподарські угіддя почали заростати чагарниками, деревами та багаторічними травами.

Згідно з оцінками лісопатологів, частка лісів на території зони відчуження зросла з 45% у 1986 році до понад 60% у 2020-х роках. Основними типами лісу є соснові (Pinussylvestris), дубово-березові, вільхово-осикові та змішані ліси. Найбільшу площу займають соснові ліси, які характерні для піщаних ґрунтівПолісся. Часто вони мають монокультурну структуру, що підвищує вразливість до шкідників, хвороб та вогню.

Горючі матеріали та їх роль у поширенні вогню. Головними типами горючих матеріалів у лісах ЧЗВ є:

- суха лісова підстилка (хвоя, листя, трава);

- відмерла деревина (сухостій, повалені дерева);

- мохово-чагарниковий покрив;

- молоді насадження, які формують щільний нижній ярус.

Ці елементи утворюють так звану 'горючу безперервність' — вертикальну та горизонтальну структуру, яка сприяє поширенню пожежі з підстилки до крон. Найнебезпечнішими є умовно 'безгосподарні' ліси, в яких не проводиться прибирання відмерлої біомаси, проріджування, санітарнавирубка. У суху пору року навіть іскра може спричинити займання, яке розповсюджується стрімко й неконтрольовано.

Відсутність лісогосподарського нагляду. Через обмеження на доступ до територій, що мають високий радіаційний фон, більшістьлісів ЧЗВ залишаються без лісогосподарського нагляду. Накопичення сухої біомаси, включаючи повалені дерева, сухостій, залишки деревини після вітровалів та сніголомів, створюєумови для формування потужного горючого шару. Це підвищує не лише ризик займання, але й інтенсивність горіння. Наприклад, у 2020 році внаслідок потужної весняної пожежі вигоріло понад 11 500 га лісу. Частина території охоплювала сааме такі 'проблемні' ліси з великим навантаженням відмерлої деревини.

Роль торфовищ та заболочених лісів. На території ЧЗВ розташована значна кількість торфовищ, які в літню пору пересихають і стають джерелом тривалих, глибоких тлінних пожеж. Такі пожежі є особливо небезпечними, оскільки часто не мають відкритого полум’я, а горіння відбувається в глибших шарах торфу, що унеможливлює їх швидке виявлення й гасіння. Торф’яні пожежі є потужним джерелом викидів вуглекислого газу та диму, зокрема з радіонуклідами, які накопичуються в цих шарах.

Радіоекологічна складова рослинності. Рослинність зони відчуження накопичує радіонукліди через кореневу систему, зокрема цезій-137 та стронцій-90. У разі пожежі ці елементи вивільняються в атмосферу внаслідок горіння деревини, хвої, кори та підстилки. Найбільш забруднені радіонуклідами ділянки — це північна та західна частини ЧЗВ, де щільність забруднення цезієм перевищує 1480 кБк/м². Прикладом негативного сценарію стала пожежа у 2020 році, коли дим із зон горіння фіксувався супутниками Sentinel-5P, а вміст цезію в повітрі у Києві зростав у декілька разів вище за фон.

Екологічні наслідки та висновки. Рослинний покрив ЧЗВ, з одного боку, демонструє відновлення природних процесів, з іншого — формує високий ризик лісових та торф’яних пожеж. Відсутність господарського втручання, поєднана з радіоактивним забрудненням і зміною клімату (зокрема тривалішими посушливими періодами), створює унікальну ситуацію, що вимагає постійного моніторингу та прогнозування. Ліси без догляду, з високим вмістом горючої маси, фактично є 'тихою загрозою', яка в будь-який момент може перейти у фазу надзвичайної ситуації.

1.4 Радіоекологічні аспекти лісових пожеж у ЧЗВ

Радіоактивне забруднення ЧЗВ: характеристика і розподіл. Після аварії на ЧАЕС у 1986 році значна кількість радіоактивних ізотопів була викинута в атмосферу, де вони осіли на поверхні землі у вигляді радіоактивного осаду. Найбільш значущими з точки зору впливу на довкілля є такі радіонукліди: цезій-137 (137Cs), стронцій-90 (90Sr), плутоній-239 (239Pu) та америцій-241 (241Am). Ці елементи мають різні фізико-хімічні властивості, періоди напіврозпаду та біологічну активність. Наприклад, 137Cs рівномірно розподіляється у ґрунтах і активно включається в ланцюги живлення, тоді як 239Pu має високу токсичність, але обмежену мобільність.

Розподіл забруднення в ЧЗВ залежить від метеоумов на момент аварії, типу ґрунтів, рельєфу місцевості та наявності рослинності. Найвищі рівні активності зареєстровані у 'зонах плям', зокрема в Рудому лісі та в західних районах зони, де щільність забруднення 137Cs перевищує 1480 кБк/м².

Поведінка радіонуклідів у лісових екосистемах. Лісові екосистеми ЧЗВ відіграють роль як поглиначів, так і накопичувачів радіонуклідів. Після випадіння радіоактивного осаду частинки осідають на кронах дерев, трав’янистому покриві, мохах, лишайниках. З часом вони переміщуються в нижні шари — підстилку і мінеральний ґрунт, де фіксуються в ґрунтово-гумусових комплексах. Радіонукліди також абсорбуються кореневими системами рослин, після чого циркулюють у фітобіомасі.

Флора ЧЗВ здатна активно накопичувати 137Cs у хвої, листі, плодах, а також у деревині. Це створює передумови для вторинного викиду радіоактивності під час лісових пожеж. Дослідження вказують, що понад 50% цезію в типовому лісі зосереджено в надземній біомасі — в підстилці, траві та деревних рештках.

Механізм вивільнення радіонуклідів під час пожежі. Пожежі в лісових масивах зони відчуження супроводжуються процесом повторного вивільнення радіонуклідів у повітря. Цей механізм включає термічне розкладання органічної речовини, в якій накопичені радіоактивні частинки. У результаті горіння хвойного опаду, підстилки, мохів, кори дерев в атмосферу потрапляють аерозольні форми радіоактивних речовин, які можуть поширюватися на значні відстані (до сотень кілометрів).

Ці аерозолі становлять реальну небезпеку, оскільки містять частинки розміром менше 10 мікрометрів, здатні проникати в дихальні шляхи людини. У випадку сильного вітру та висхідного потоку повітря, радіоактивний дим може перетинати державні кордони та змінювати радіаційний фон у прилеглих регіонах.

Наслідки повторного забруднення середовища. Наслідки повторного вивільнення радіонуклідів при лісових пожежах багатовимірні. З екологічної точки зору — це:

- реконтамінація поверхні ґрунтів на незабруднених територіях;

- потрапляння ізотопів у ланцюги живлення через рослинність;

- вплив на водні ресурси внаслідок атмосферних осадів.

Із санітарно-гігієнічного боку, пожежі підвищують ризик інгаляційного опромінення населення поблизу ЧЗВ, зокрема працівників ДСП 'ЦОТІЗ', пожежників, туристів та місцевого населення у Київській області.

Також не можна ігнорувати соціальний фактор: попри низьку реальну дозу опромінення, сам факт 'радіоактивного диму' викликає стрес та хвилювання в суспільстві, особливо при активному висвітленні у ЗМІ.

Системи моніторингу та прогнозування впливу пожеж. Моніторинг пожежної активності та радіаційного впливу базується на трьох рівнях:

1) супутникові системи — Sentinel, MODIS, VIIRS, FIRMS;

2) наземні станції — автоматизовані пости радіаційного контролю (РАС), гідрометеорологічні станції;

3) математичні моделі — HYSPLIT, FLEXPART, які моделюють переміщення радіоаерозолів.

Приклад: у квітні 2020 року система HYSPLIT показала, що хмара диму від пожеж у ЧЗВ досягла Києва за 6 годин після початку інтенсивного горіння. Результати були підтверджені даними зі станцій моніторингу EcoCity та SaveDnipro, які вказували на зростання концентрації PM2.5 і ймовірне вивільнення цезію-137.

Рекомендації щодо зниження ризиків. Для зменшення ризиків радіоекологічного забруднення внаслідок пожеж у ЧЗВ слід реалізувати такі заходи:

- запровадження розчищення горючої біомаси в зонах з високим рівнем забруднення;

- створення буферних зон і мінералізованих смуг для обмеження поширення вогню;

- використання безпілотних літальних апаратів для патрулювання та тепловізійного виявлення загорянь;

- удосконалення системи раннього сповіщення населення про пожежі та їх наслідки;

- активна міжнародна співпраця для отримання доступу до технологій прогнозування та протипожежного реагування.

Також слід посилити наукову підтримку шляхом залучення дослідницьких інституцій до регулярного аналізу біомаси, ґрунтів та повітря на предмет накопичення та переміщення радіонуклідів.

Розділ 2. Теоретичні основи формування та оцінки пожежонебезпечних умов погоди

Чорнобильська зона відчуження (ЧЗВ) є унікальною територією з особливим екологічним, техногенним і соціальним статусом. Після аварії на Чорнобильській АЕС у 1986 році зона була заселена радіоактивними елементами, які сформували складну екосистему з високим рівнем потенційної небезпеки при втручанні природних або антропогенних чинників. Одним із ключових ризиків на території ЧЗВ залишаються лісові пожежі, які не лише руйнують екосистеми, а й можуть спричинити вторинне вивільнення радіонуклідів у довкілля. У цьому розділі розглянуто екологічні особливості Зони, інфраструктуру моніторингу, історичні випадки пожеж та потенційні наслідки таких подій.

2.1 Поняття та класифікація пожежонебезпечних умов погоди

Поняття пожежонебезпечних умов погоди.

Пожежонебезпечні умови погоди — це сукупність метеорологічних показників, які створюють передумови для виникнення та поширення пожеж у природних екосистемах, зокрема в лісах, степах і на торфовищах. Такі умови виникають внаслідок тривалих періодів посушливої погоди, високої температури повітря, низької відносної вологості, відсутності істотних опадів та наявності вітру, що підсилює випаровування вологи з горючих матеріалів та сприяє швидкому поширенню вогню.

У контексті зон із підвищеним екологічним ризиком, таких як Чорнобильська зона відчуження, значення поняття пожежонебезпечних умов погоди набуває особливої важливості. Через високу концентрацію радіонуклідів, які накопичились у лісовій підстилці, верхньому шарі ґрунту

та рослинності, навіть незначна пожежа може спричинити масштабне вторинне радіоактивне забруднення атмосфери та навколишніх територій.

Пожежонебезпечні умови погоди — це складний комплекс атмосферних характеристик, які створюють сприятливі передумови для виникнення, розвитку та поширення природних і техногенних пожеж, зокрема в лісових масивах. До основних чинників, що формують такі умови, належать тривалий дефіцит опадів, високі температури повітря (особливо понад +30 °C), знижена відносна вологість (нижче 30 %), сильні й сухі вітри, які посилюють випаровування та сприяють швидкому поширенню вогню, а також знижена вологість горючих матеріалів у приземному шарі (лісова підстилка, сухостій, хвоя, опале листя).

Класифікація пожежонебезпечних умов погоди здійснюється на основі різноманітних національних і міжнародних методик, у яких застосовуються математичні індекси небезпеки. Найпоширенішим у світі є Канадський індекс пожежної небезпеки лісів (FWI — FireWeatherIndex), який враховує п'ять базових параметрів: температуру повітря, вологість, швидкість вітру, кількість опадів та вологість мертвого органічного шару. В Україні найчастіше використовуються методики, адаптовані Українським гідрометеорологічним центром, зокрема показник Нестерова, який є інтегральним індексом пожежної небезпеки в лісах і базується на добовому балансовому підрахунку відносної вологості й температури повітря. Також враховуються класи пожежної небезпеки за п’ятибальною шкалою: від 1 (низька) до 5 (надзвичайна).

Крім того, у сучасних умовах активного розвитку кліматичних змін і зростання частоти екстремальних погодних явищ особливого значення набуває оперативна оцінка синоптичної ситуації та використання прогнозних моделей для виявлення потенційно небезпечних періодів.

Класифікація пожежонебезпечних умов погоди.

Метеорологічні чинники є фундаментальним компонентом у формуванні та підтримці умов, сприятливих для виникнення природних пожеж. До них належать: температура повітря, відносна вологість, швидкість і напрямок вітру, кількість атмосферних опадів, інтенсивність сонячного випромінювання, а також рівень випаровування вологи з ґрунту і рослинного покриву.

Висока температура повітря сприяє прискоренню випаровування вологи з ґрунту, рослинності та підстилки, що призводить до їх висушування. Особливо небезпечними вважаються тривалі періоди з температурами понад 30–35 °C, які в умовах відсутності опадів суттєво знижують вологість рослинного покриву, роблячи його вразливим до займання. Водночас відносна вологість повітря є показником, який безпосередньо впливає на стан горючих матеріалів. Якщо вологість повітря знижується до рівня нижче 30 %, це створює сприятливі умови для самозаймання сухої трави та лісової підстилки.

Швидкість і напрямок вітру є критично важливими чинниками для поширення пожежі. Вітер сприяє доступу кисню до осередків горіння, прискорює випаровування вологи, а також механічно переносить палаючі частки (іскри, жарини) на великі відстані, викликаючи нові осередки займання. Особливу небезпеку становлять суховії та шквали. Кількість та частота опадів напряму впливають на пожежну ситуацію: тривала їх відсутність спричиняє пересихання ґрунту та накопичення легкозаймистої біомаси.

Рівень випаровування залежить як від кліматичних умов (температура, радіаційний фон, вітер), так і від типу місцевої рослинності. У Чорнобильській зоні ці процеси посилюються через деградовані екосистеми та змінений гідрологічний режим.

Таким чином, комплексна дія метеорологічних факторів визначає пожежонебезпечний потенціал території. Моніторинг їхніх змін у часі, а такожмоделювання на основі прогнозів дозволяють своєчасно передбачити критичні періоди та запобігти масштабним природним пожежам.

В Україні пожежонебезпечні умови погоди класифікуються на основі методики визначення класів природної пожежної небезпеки за погодними умовами, яка розроблена на базі міжнародних практик і адаптована до особливостей клімату та лісового покриву України. Основою для класифікації є Комплексний показник пожежної небезпеки за погодними умовами (КППН).

Цей показник враховує:

- температуру повітря на рівні 2 м над ґрунтом;

- кількість опадів за останні 3 доби;

- тривалість сухого періоду;

- вологість повітря;

- швидкість і напрям вітру.

Згідно з Правилами пожежної безпеки в лісах України, залежно від значення КППН виділяють п’ять класів пожежної небезпеки (табл.. 1):

Таблиця 1. Класи пожежної небезпеки.

Клас	Оцінка ризику	Значення КППН	Характеристика
I	Мінімальна пожежна небезпека	до 400	Погодні умови несприятливі для виникнення й поширення пожеж.
II	Низька пожежна небезпека	401–1000	Можливе локальне загоряння при наявності джерела вогню.

III	Середня пожежна небезпека	1001–3000	Пожежі можливі в сухих ділянках лісу. Необхідні превентивні заходи.
IV	Висока пожежна небезпека	3001–5000	Сприятливі умови для виникнення та швидкого поширення вогню.
V	Надзвичайна пожежна небезпека	понад 5000	Критичніумови. Рекомендується заборона відвідування лісів, введення надзвичайного стану.

Комплексний показник може розраховуватись за допомогою автоматизованих систем моніторингу та даних метеостанцій. На основі цих даних органи лісового господарства та надзвичайних ситуацій приймають рішення про обмеження доступу до лісів, розгортання протипожежних сил і засобів тощо.

Особливістю застосування цієї класифікації у Чорнобильській зоні є необхідність врахування не лише стандартних метеоумов, а й радіоекологічних чинників, таких як щільність забруднення ґрунту радіонуклідами (^137Cs, ^90Sr, ^241Am), які впливають на стратегії попередження і гасіння пожеж.

2.2 Метеорологічні чинники, що впливають на пожежну небезпеку

Пожежна небезпека в природних екосистемах безпосередньо залежить від комплексу метеорологічних чинників, які впливають як на саму ймовірність виникнення пожеж, так і на інтенсивність їхнього розвитку та поширення. У контексті Чорнобильської зони відчуження, де ліси й торфовища зазнали радіоактивного забруднення, метеоумови мають

вирішальне значення для запобігання масштабним вторинним викидам радіонуклідів в атмосферу.

Найбільш критичними є наступні чинники:

Температура повітря. Підвищення температури повітря веде до активного висихання рослинності, лісової підстилки та торфу. При температурі понад +25 °C ризик виникнення пожеж зростає експоненційно, особливо якщо такі значення тримаються кілька днів поспіль. У Чорнобильській зоні особливо небезпечними є періоди літньої спеки, які супроводжуються відсутністю опадів і низькою вологістю повітря.

Вологість повітря та ґрунту. Низька відносна вологість повітря (нижче 30%) значно прискорює випаровування вологи з рослинності. Зокрема, лісова підстилка й суха трава стають вкрай легкозаймистими. Вологість ґрунту також важлива — її зниження веде до підсушування торфу, який у сухому стані є надзвичайно небезпечним джерелом тривалих тління і пожеж. У зоні відчуження торфовища поширені, і під час тривалих посух стають джерелами глибоких, важко контрольованих займання.

Кількість опадів. Недостатня кількість атмосферних опадів є ключовим чинником формування пожежонебезпечних умов. Посушливі періоди тривалістю понад 10 діб створюють умови для накопичення великої маси сухих горючих матеріалів. У Чорнобильській зоні часто спостерігаються літні антициклони з відсутністю опадів, що потребує постійного моніторингу та завчасної готовності до реагування.

Вітер. Вітер є одним з основних факторів поширення пожеж. Він не лише сприяє перенесенню вогню та іскор на значні відстані, але й інтенсифікує горіння шляхом постачання кисню. При швидкості вітру понад 5 м/с ризик стрімкого поширення вогню значно зростає. У зоні відчуження вітер також може сприяти переносу радіоактивного диму на великі відстані.

Атмосферний тиск та циркуляція повітря. Атмосферні фронти та циркуляційні процеси можуть сприяти утворенню термічних інверсій — коли тепле повітря блокує підйом диму, концентруючи його в приземному шарі. Це підвищує токсичне навантаження на навколишнє середовище. У радіоактивно забруднених зонах такий дим може містити частинки ^137Cs та інших небезпечних ізотопів, що призводить до забруднення повітря та повторного випадіння радіоактивних речовин.

2.3 Індекси та методи оцінки пожежної небезпеки

Розрахунок індексів пожежної небезпеки. На основі метеоданих проводився розрахунок індексу ППН Нестерова та його модифікацій, канадського FWI (Fire Weather Index). Це дозволило оцінити як короткострокову, так і середньострокову пожежнунебезпеку.

Кореляційно-регресійний аналіз. Проведено статистичний аналіз залежності частоти пожеж від кліматичних, географічних та антропогенних факторів. Встановлено лінійну й нелінійну залежність між температурними аномаліями та кількістю пожежних інцидентів у ЧЗВ.

Метод аналогів та компаративний підхід. Здійснено порівняння ЧЗВ з іншими регіонами світу, що зазнали радіоактивного забруднення (наприклад, Фукусіма, Ханфорд, Семипалатинськ), з метою виявлення спільних закономірностей у динаміці екосистем і ризику пожеж.

Обґрунтування вибору методів. Застосування багаторівневої методології забезпечило комплексне охоплення об’єкта дослідження — ЧЗВ. Сполучення даних дистанційного моніторингу з польовими спостереженнями, екологічною статистикою, метеорологічними архівами та геоінформаційними інструментами дозволило не лише встановити поточний рівень пожежонебезпеки, а й змоделювати його динаміку на перспективу.

Таким чином, у роботі реалізовано інтегративний підхід до вивчення природних та техногенних факторів, які визначають пожежонебезпечність Чорнобильської зони, що дозволяє сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо управління ризиками.

2.4 Характеристика використаних даних

Для здійснення комплексного аналізу пожежонебезпечних умов погоди в Чорнобильській зонові дчуження (ЧЗВ) у роботі було застосовано багаторівневий підхід до збору, аналізу та інтерпретації даних. Методологія дослідження охоплює використання статистичних, геоінформаційних, дистанційних та польових джерел інформації, що дозволяє інтегрувати метеорологічні, географічні, екологічні та радіоекологічні чинники.

Метеорологічні дані. Основним джерелом метеоінформації виступили спостереження, отримані з баз даних Українського гідрометеорологічного центру, а також міжнародних кліматичних систем, таких як NOAA (Національна океанічна та атмосферна адміністрація США), ECMWF (Європейський центр середньострокових прогнозів погоди) та Copernicus Climate Data Store. Дані охоплювали такі параметри: температура повітря, вологість, опади, швидкість і напрямок вітру, атмосферний тиск.

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Інформація з супутників Sentinel-2, MODIS та VIIRS була використана для аналізу індексу вегетації (NDVI), температури поверхні (LST), виявлення активних термічних аномалій та візуалізації зон попередніх пожеж. ДЗЗ надало змогу здійснювати просторово-часовий моніторинг території у високій роздільності.

Радіоекологічні бази даних. Використовувалися дані Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, Центру радіоекологічного моніторингу ДСП «Екоцентр» та МАГАТЕ, зокрема щодо щільності радіоактивного

забруднення, карт розподілу ізотопів (Cs-137, Sr-90, Pu-239/240), радіаційного фону в реальному часі.

Літературні та аналітичні джерела. Було опрацьовано понад 30 наукових праць, звітів, методичних рекомендацій та міжнародних протоколів (FAO, UNEP, IAEA) щодо оцінки пожежної небезпеки в умовах техногенного забруднення.

Розділ 3. Розрахунок та оцінка показника пожежної небезпеки ППН В.Г. Нестерова та його модифікацій за даними кліматичних моделей CORDEX/GCM. Порівняльна оцінка ППН та FWI.

Лісові пожежі залишаються одним із наймасштабніших і найнебезпечніших природних катаклізмів, що завдають значних збитків екосистемам, господарській діяльності та безпеці населення. Забезпечення своєчасної та ефективної протидії пожежам, зокрема в частині підготовки технічних засобів та персоналу, значною мірою залежить від достовірного прогнозування ступеня пожежної небезпеки на різних часових інтервалах. Над розробкою та вдосконаленням критеріїв, що дозволяють оцінити ймовірність виникнення пожеж, працюють численні науковці. Проте створення універсального показника, який би точно відображав реальні умови виникнення пожеж, досі залишається складним завданням. Основними причинами є висока варіативність природних умов, поєднання численних природних і антропогенних чинників, а також обмежена доступність якісних спостережних даних.

Метеорологічні умови визнаються одними з головних чинників, що визначають ймовірність загоряння в природному середовищі. В Україні для оцінки пожежної небезпеки використовується комплексний показник пожежної небезпеки за метеоумовами (КПНУ), який є офіційним інструментом Українського гідрометеорологічного центру. Основою його розрахунку є методика, розроблена В. Г. Нестеровим, із подальшими модифікаціями з урахуванням таких факторів, як кількість опадів та швидкість вітру.

Пожежна небезпека у трав’янистій рослинності залежить як від властивостей самих рослин (однорічні чи багаторічні, фаза вегетації, ступінь висихання, щільність, співвідношення зеленої маси та сухої), так і від погодних умов, які у певні періоди можуть відігравати вирішальну роль у

ініціюванні та поширенні вогню. Впродовж вегетаційного циклу трав'яні рослини проходять низку фенологічних фаз, зокрема: сходи, весняне відростання, кущіння, утворення розеток, колосіння, цвітіння, плодоношення, відмирання пагонів тощо. Найвищий рівень пожежної небезпеки спостерігається у фазах відмирання рослинності та її переходу у стан сухої маси, що завершується до настання зими, а також на початку нового вегетаційного циклу – до появи сходів і весняного відростання.

У зазначений період рослинні залишки характеризуються високою здатністю до займання, легко спалахують і швидко поширюють вогонь. Роль погодних умов, таких як температура повітря, вологість, кількість та інтенсивність опадів, а також швидкість вітру, суттєво зростає, оскільки ці чинники безпосередньо впливають на процес висушування як мертвої, так і живої рослинної маси. Горіння трав’яного покриву має низку особливостей: високу швидкість поширення полум’я, здатність охоплювати великі площі, проникати крізь різноманітні перешкоди (автомобільні дороги, водні об’єкти, мінералізовані смуги). На відміну від лісових або чагарникових типів рослинності, трав’яний покрив швидше реагує на метеорологічні зміни і є значно вразливішим до займання.

Особливої уваги заслуговує зміна вологості трав’яної рослинності протягом доби: максимальний ризик виникнення загоряння припадає на час найвищих температур. Серед погодних чинників особливу роль відіграє вітер, вплив якого у пожежонебезпечний період є визначальним.

Оцінювання рівня пожежної небезпеки за метеоумовами здійснюється на основі відповідних індексів, таких як FWI (FireWeatherIndex), а також адаптованого до українських умов показника ППН (по Нестерову), який враховує баланс між чинниками, що сприяють висушуванню рослинної маси, та зволожувальними впливами.

3.1 Методики розрахунку показника пожежної небезпеки В.Г. Нестерова та його модифікацій

Було виконано обчислення метеорологічного індексу пожежної небезпеки за методом В. Г. Нестерова та його модифікованими варіантами з використанням авторського програмного забезпечення, розробленого мовою програмування “MapBasic”. Індекс ППН розраховується як накопичена сума добутку температури повітря на різницю між температурою повітря та точкою роси для конкретного пункту й заданого моменту часу згідно з відповідною формулою.

$$КПО_N = КПО_{N-1} \cdot K_{ос} + [t(t - t_d)]_N, \quad (3.1)$$

де $КПО_N$ – значення КПО, що розраховується на поточний день, °С;

$КПО_{N-1}$ – значення КПО, що розраховується за попередній день, $КПО_{N-1}$ = t (t-td), °С;

$К_{ос}$ – 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 найближчий до нього строк синхронних метеорологічних спостережень, °С;

t_d – точка роси за той же строк, °С;

$(t – t_d)$ – дефіцит точки роси, °С.

Таблиця 3.1 – Відповідність середньодобової кількості опадів величині коефіцієнта поправок на опади ($К_{оспв1}$).

Опади, мм	$К_{оспв1}$
Менше 0,5	1,0
Від 0,6 до 2,0	0,8
Від 3,0 до 5,0	0,4
Від 6,0 до 12,0	0,2
Від 13,0 до 19,0	0,1
Більше 19,0	0,0

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

Розрахунок ПВГ здійснюється за формулою [5]:

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

(3.2)

де $(ПВГ)_N$ – значення ПВГ, що розраховується на поточний день, °С;

$(ПВГ)_{N-1}$ – значення ПВГ, що розраховується на попередній день, °С;
$К_{оспвг}$ - коефіцієнт поправки на гігроскопічність.

Для розрахунку $К_{оспвг}$ використовуємо методику з урахуванням сумарної кількості опадів, що випали:

$$K_{оспвг} = \frac{1,8}{(ОС+1)}, \qquad (3.3)$$

де ОС – сума опадів протягом останніх 24 години, мм. Якщо ОС менше 0,6 мм, то $К_{оспвг}$ приймають рівним одиниці.

В Україні комплексна методика оцінки природної пожежної, 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. Оцінку природної

пожежної небезпеки за умов погоди запропоновано проводити за *уточненим комплексним показником природної пожежної небезпеки* за умов погоди (*КПНУ*), який обчислюється за формулою:

$$\text{КПНУ}_{n,i} = \text{КПНУ}_{(n-1),i}\text{Коп}_{n,\text{i}} + \text{К}v_{n,i}[t_{n,i}(t_{n,i} - td_{n,i})], \quad (3.4)$$

де $КПНУ_{n/i}$ – значення КПНУ за поточний день *n* в *i-му* пункті, °С;

$КПНУ_{(n-1),i}$ – значення КПНУ за попередній день (*n-1)* в *i-му* пункті;

$Коп_{n,i}$–коригуючий коефіцієнт на кількість опадів в *i-му* пункті;

$Кv_{n,i}$– 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, °С;

$td_{n,i}$ – температура точки роси за той же строк, °С;

$(t_{n,i} - td_{n,i})$ – дефіцит точки роси за поточний день *n* в *i-му* пункті, °С.

Коригуючий коефіцієнт на кількість опадів в *i-му* пункті визначається за формулою:

$$\text{К}оп_{n,i} = 1 - R_{n,i}/Rm_{i,j}, \quad (3.5)$$

де $R_{n,i}$ – кількість опадів за поточний день *n* в *i-му* пункті, мм;

$Rm_{i,j}$ – межа пожежонебезпечного періоду в *i-му* пункті для *j*-го типу грунтів, мм.

Коригуючий коефіцієнт на максимальну швидкість вітру за добу $Кv_{n,i}$ в *i-му* пункті обчислюється за формулою:

$$Kv_{n,i} = 0{,}9 + 0{,}056V_{n,i} - 0{,}001V_{n,i}^2, \quad (3.6)$$

де $V_{n,i}$ – максимальна швидкість вітру за поточний день *n* в *i-му* пункті, м/с.

Обчислені за формулою (3.6) коефіцієнти $Кv_{n,i}$ відображають вплив швидкості вітру на виникнення і поширення лісових пожеж, виявлений Л. І Сверловою [4]. Коефіцієнти$Кv_{n,i}$ можна також визначити заданими табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнт пожежної небезпеки *Кv*, що враховує вплив

швидкості вітру (V) на виникнення і поширення лісових пожеж за Л. І Сверловою [4]

V, м/с	*Kv*	V, м/с	*Kv*	V, м/с	*Kv*	V, м/с	*Kv*
0	1,00	5	1,16	10	1,39	15	1,47
1	1,02	6	1,22	11	1,41	16	1,48
2	1,04	7	1,28	12	1,43		
3	1,07	8	1,32	13	1,45		
4	1,11	9	1,36	14	1,45		

За отриманим числовим значенням ППО за допомогою шкали (табл. 3.3) визначається клас та ступінь пожежної небезпеки.

Таблиця 3.3 – Градації рівнів показників пожежної небезпеки (ППО)

Градації значень $ППО_н$	Ступінь пожежної небезпеки	Клас пожежної небезпеки
<400	безпечний	1
401 –1000	низький	2
1001 –3000	помірний	3
3001 – 5000	високий	4
>5000	надзвичайний	5

У табл. 3.4 представлена шкала відповідності значень Індексу пожежної небезпеки FWI Канади.

Таблиця 3.4 – Шкала значень Канадського індексу пожежної небезпеки FWI

Клас пожежної небезпеки	Градації індексу FWI	Ступень пожежної небезпеки
1	<5,2	дуже низький
2	5,2 – 11,2	низький

3	11,2 – 21,3	помірний
4	21,3 – 38,0	високий
5	38,0 – 50,0	дуже високий
6	>=50,0	екстремальний

Для порівняльного аналізу значень погодного пожежного показника ППН, розрахованих за 4-ма наведеними вище методиками, та результатами розрахунку показника FWI (за прогностичною моделлю MPI), обрано найбільш успішний варіант за наступним алгоритмом:

1) порівняльна оцінка середньомісячних значень та динаміка змін за період 2006-2020 рр.;

2) динаміка річного перебігу середньомісячних значень ППН за запропонованими методиками;

3) розрахунок кількості днів з різними класами небезпеки з використанням індексів ППН та FWI та проведення порівняння по суміщеній класифікації (табл. 3.5);

4) порівняльний аналіз показника пожежної небезпеки ППО В. Г. Нестерова та його модифікацій з Канадським індексом пожежної небезпеки FWI;

5) рекомендації щодо використання індексів ППОн та FWI.

Таблиця 3.5 – Таблиця відповідності градацій індексів пожежної небезпеки ППН та FWI

Клас пожежної небезпеки	Градації рівнів показника пожежної небезпеки	
	$ППО_н$ Нестерова	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 >=50,0 – екстремальний

3.2 Порівняльна оцінка середньомісячних значень та динаміка річного ходу середньомісячних значень ППН за період 2006 – 2020рр.

Для аналізу рівня пожежної небезпеки в природних екосистемах Чорнобильсько зони відчуження було досліджено середньомісячні значення модифікованого показника Нестерова (ППН) за період з 2006 по 2020 рік. Цей показник є важливим інструментом оцінювання метеорологічних умов, що сприяють виникненню та поширенню ландшафтних пожеж.

Аналіз середньомісячних значень дозволив визначити сезонні особливості пожежної небезпеки. У більшості років максимальні значення ППН припадали на літні місяці — червень, липень та серпень. Саме в цей період спостерігався найбільший дефіцит атмосферної вологи за умов високих температур повітря, що зумовлює інтенсивне висушування рослинного покриву.

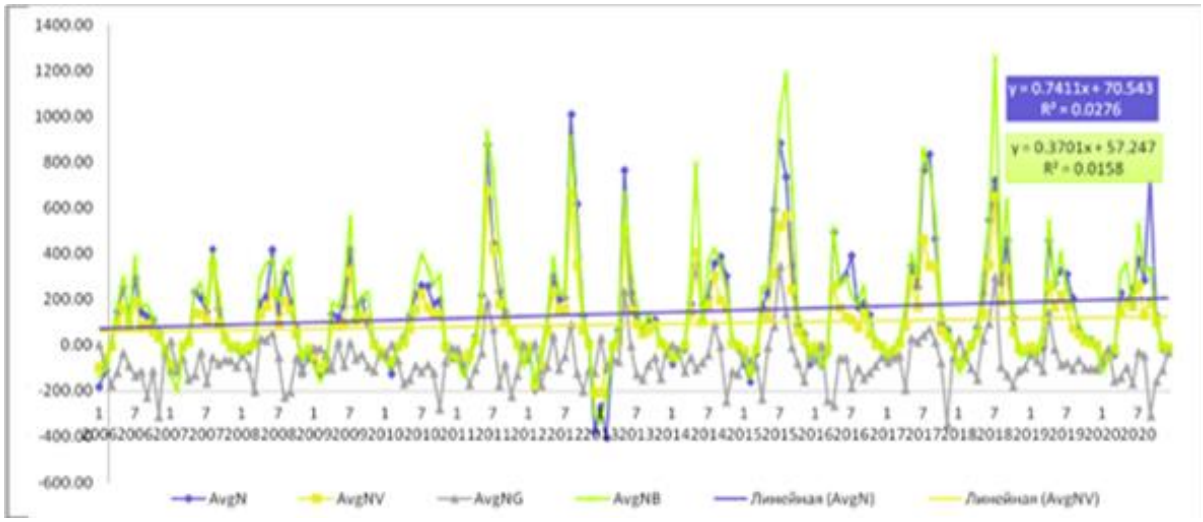


Рисунок 3.2.1 – Динаміка середньомісячних значень ППН за період 2006 – 2020 рр. для м. Чорнобиль.

На рисунку 3.2.1 наведено порівняння чотирьох варіантів розрахунку показника пожежної небезпеки ППН. Позначення мають такі значення: **AvgN** — базовий варіант ППН, обчислений за методикою В. Г. Нестерова; **AvgNV** — модифікація, розроблена ЛенНДІЛХ, яка враховує вологість поверхневого

покриву; **AvgNG** — варіант, запропонований М. А. Сафроновим та А. В. Волокитиною, із урахуванням гігроскопічної вологості мохового шару; **AvgNB** — версія В. А. Балабух, яка включає вплив кількості опадів та максимальної швидкості вітру.

Аналіз графічних матеріалів (рис. 3.2.1) свідчить про те, що методика, в якій враховується гігроскопічна вологість мохоподібної рослинності (AvgNG), є непридатною для умов Українського Полісся. Це пояснюється тим, що переважна частина значень показника виявилась від'ємною, що зумовлено стабільно високим рівнем атмосферної вологості в досліджуваному регіоні. У зв'язку з цим дана модифікація ППН не розглядатиметься в подальшому аналізі.

Результати лінійної апроксимації середньомісячних значень для м. Чорнобиль, демонструють повільну позитивну тенденцію. Протягом досліджуваного періоду (2006–2020 рр.) це зростання становить приблизно 50–100 одиниць, що може вказувати на поступове посилення пожежонебезпечних кліматичних умов у регіоні.

2) Розглянемо річний хід середньомісячних значень ППН за 30 років (2006 – 2035рр.) за прогностичними даними моделі MPI (ФРН), представлену на рис. 3.2.2.

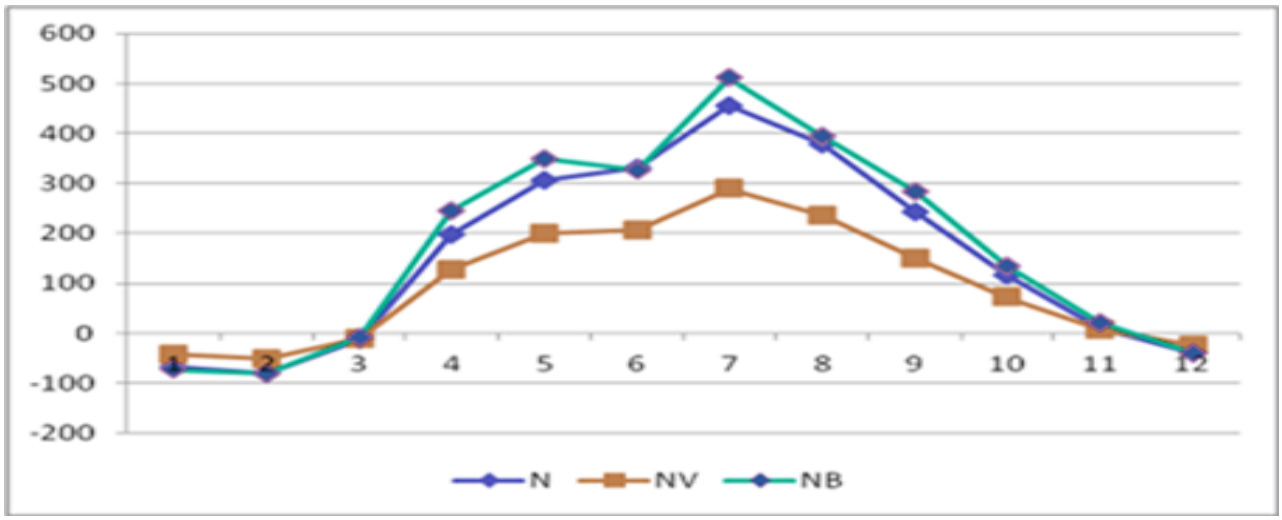


Рис. 3.2.2 - Динаміка річного ходу середньомісячних значень ППН для м. Чорнобиль.

Здійснено аналіз отриманих даних із подальшим узагальненням статистичної інформації для двох часових інтервалів: 2006–2020 та 2021–2035 роки. Було визначено середньорічну кількість днів з різними рівнями пожежної небезпеки за індексом ППН та його варіантами для всіх класів небезпеки, використовуючи глобально-регіональну кліматичну модель MPI-ESM-LR-RCP 2.6, а також індекс FWI на основі даних ERA5 та моделі MPI.

Результати подано у формі гістограм, що демонструють річні зміни кількості днів за кожним класом пожежної небезпеки, порівняльної таблиці, де вказано розподіл класів ППН та FWI у відсотковому відношенні до загальної кількості випадків, отриманих за допомогою різних джерел метеорологічних прогнозів — зокрема реаналізу ERA5 і моделі MPI, графіків динаміки кількості днів із пожежною небезпекою другого класу і вище для трьох досліджуваних пунктів з побудовою лінійної тенденції в межах періодів 2006–2020, 2021–2035 і 2006–2035 років згідно з методиками ППН та FWI, статистичного узагальнення частоти випадків кожного класу пожежної небезпеки за ППН та FWI окремо для обох розглянутих періодів.

3.3 Порівняльний аналіз показника пожежної небезпеки ППН В.Г.Нестерова та його модифікацій з Канадським індексом пожежної небезпеки FWI, розрахованими за даними глобальної кліматичною моделі MPI-M-MPI-E#SM-LR/RCA4.

Для подальшого дослідження ефективності методик розрахунку ППН і FWI буде виконано підрахунок кількості днів за кожним класом пожежної небезпеки. Зокрема, визначатимуться класи пожежонебезпечності та кількість днів, що їм відповідають (1–5 класи). Розрахунки охоплюють період 2006–2035 років для м. Чорнобиль і виконуються за трьома методичними

підходами, використовуючи як архівні метеодані ERA5, так і прогностичні дані моделі MPI.

Аналіз графіків свідчить про зростання кількості випадків пожежної небезпеки 4-го та 5-го класів у період 2006–2020 років. Варто зазначити, що індекс пожежної небезпеки FWI, який обчислюється за методологією Європейської системи прогнозування пожеж (EFFIS), базується на метеорологічних даних глобальних моделей проєкту CORDEX. Ці моделі не враховують специфіку кліматичних умов Українського Полісся, що може призводити до завищення показників та неточностей у результатах.

Визначено річну кількість днів із різними рівнями пожежної небезпеки за індексом ППН та його модифікаціями для всіх класів, на основі даних глобально-регіональної кліматичної моделі MPI-ESM-LR-RCP 2.6, а також індексу FWI, розрахованого за метеорологічною інформацією з баз ERA5 і MPI.

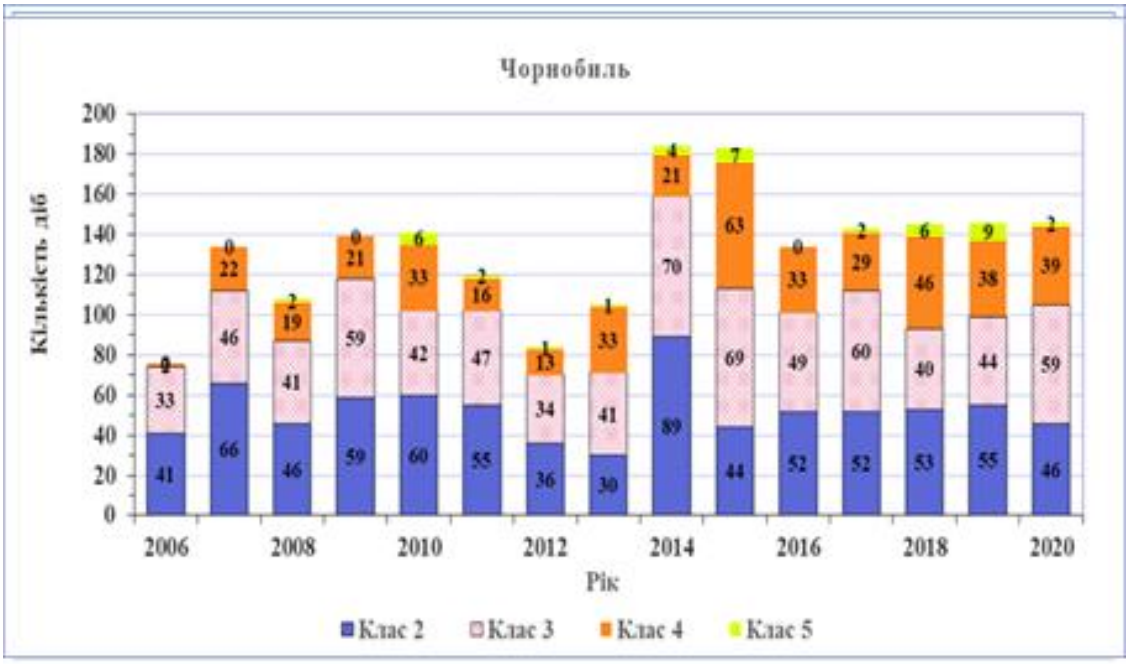
Отримані результати подано у форматі:

- гістограм що ілюструють порівняння річної кількості днів за кожним класом пожежної небезпеки у різні роки;

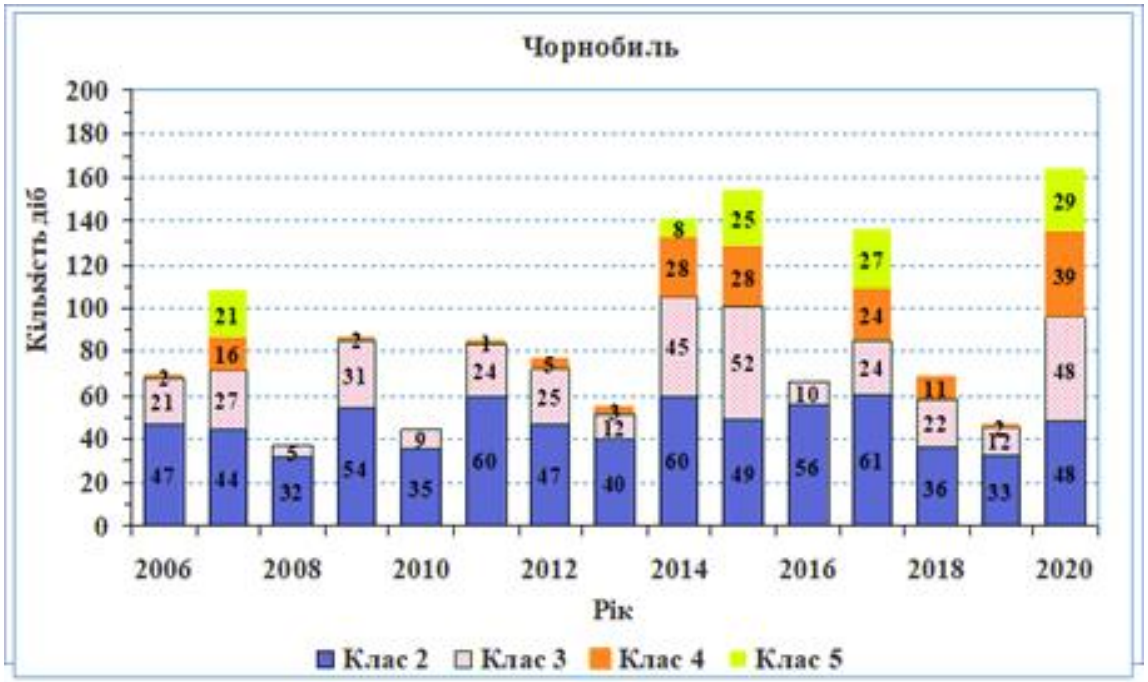
- порівняльної таблиці розподілу класів пожежної небезпеки за індексами ППН і FWI (у відсотках від загального числа випадків), отриманих на основі різних джерел прогностичних метеоданих — зокрема, архівних реаналізів ERA5 та глобальної кліматичної моделі MPI;

- статистичного розподілу кількості днів за кожним класом пожежної небезпеки за індексами ППН і FWI для обох періодів: 2006–2020 та 2021–2035 років

Для аналізу було виконано порівняння річного розподілу днів з індексом пожежної небезпеки ППН, обмежившись випадками з рівнями небезпеки, що перевищують 2-й клас.



(а)



(б)

Рисунок 3.3.1 – Річна кількість діб з індексом пожежної небезпеки FWI класу 2 і вище за метеоданими ERA5 (а) і MPI (б) м. Чорнобиль

З аналізу графічних матеріалів можна зробити висновок, що впродовж 2006–2020 років спостерігалося зростання кількості днів із пожежною небезпекою 4-го та 5-го класів. Варто враховувати, що індекс FWI, який обчислюється згідно з методологією Європейської системи прогнозування пожеж (EFFIS), базується на метеорологічних даних глобальних моделей проекту CORDEX, які не враховують специфіку кліматичних умов Українського Полісся. Це може призводити до завищених та не зовсім точних результатів.

Таблиця 3.3.1 – Статистика кількості діб за рік із рівнем пожежної небезпеки різних класів FWI за даними MPI2.6 у регіоні м. Чорнобиль

Статистика	Клас 2	Клас 3	Клас 4	Клас 5+6	Клас ≥ 2	Клас ≥ 3	Клас ≥ 4
2006-2020 рр.							
Кількість = 15							
Середнє, P = 95 %	46,8±5,6	24,5±8,0	10,7±7,2	7,3±6,4	89,3±23,0	42,5±20,1	18,1±13,2
Мінімум	32	5	0	0	37	5	0
Максимум	61	52	39	29	164	116	68
Дисперсія	101,0	210,0	169,0	135,0	1730,0	1320,0	569,0
Стандартне .відхилення	10,0	14,5	13,0	11,6	41,6	36,3	23,9
$Stat_{Kolmogorov-Smirnov}$	0,125	0,164	0,271	0,403	0,189	0,27	0,308
2021-2035 рр.							
Середнє, P = 95 %	48,9±5,3	28,9±5,4	17,7±6,3	7,6±5,0	103,1±10,4	54,2±13,1	25,3±10,6
Мінімум	26	7	0	0	56	7	0
Максимум	62	53	39	26	125	87	57

Дисперсія	89,7	94,7	129,0	80,0	355,2	561,0	368,0
Стандартне .відхилення	9,5	9,7	11,4	8,9	18,8	23,7	19,2
StatKolmogorov-Smirnov	0.239	0.212	0.152	0.281	0.157	0.146	0.182
Порівняння середніх двох періодів							
Дисперсія1/дисперсия2	1,13	2,22	1,31	1,69	4,87	2,35	1,55
t-статистика	-0,58	-0,98	-1,57	-0,07	-1,16	-1,04	-0,92
t крит. двостороннє	2,05	2,05	2,05	2,05	2,09	2,05	2,05
p - рівень	0,57	0,34	0,13	0,94	0,26	0,31	0,37
d Коена	0,22	0,36	0,57	0,03	0,43	0,39	0,34

Дані, наведені у таблицях а також результати попереднього аналізу демонструють узгодженість і свідчать про відсутність статистично значущих відмінностей між середніми значеннями кількості днів різних класів пожежної небезпеки у періодах 2006–2020 та 2021–2035 років. Значення t-статистики у всіх випадках менші за відповідне критичне значення tкрит., що підтверджує нульову гіпотезу про однаковість середніх.

Крім того, значення p-рівня значущості ($p > 0,05$) та низькі значення ефекту Коена (менше ніж 0,2 для ППН і менше 0,57 для FWI) підтверджують відсутність істотних статистичних відмінностей у середньорічній кількості днів для кожного класу. Водночас у період 2021–2035 років, на відміну від попереднього інтервалу, окремі роки можуть характеризуватися появою днів із пожежною небезпекою 4-го та 5-го класів.

Отже, отримані результати підтверджують обґрунтованість раніше зроблених висновків. Запропоновані підходи до оцінки рівнів пожежної небезпеки на основі погодних індикаторів (FWI та ППН) є валідними та

доцільними для спільного використання. Розподіл кількості днів з низькими класами небезпеки демонструє незначні відхилення порівняно з показниками підвищеної небезпеки. Для поглиблення аналізу доцільно залучити реальні дані про пожежі, класифіковані за ступенем небезпеки.

Таблиця 3.3.2 – Статистика кількості діб за рік із рівнем пожежної небезпеки різних класів FWI за даними MPI2.6 у регіоні м. Чорнобиль

Статистика	Клас 2	Клас 3	Клас 4	Клас 5+6	Клас ≥ 2	Клас ≥ 3	Клас ≥ 4
2006-2020 рр.							
Кількість = 15							
Середнє, P = 95 %	46,8±5,6	24,5±8,0	10,7±7,2	7,3±6,4	89,3±23,0	42,5±20,1	18,1±13,2
Мінімум	32	5	0	0	37	5	0
Максимум	61	52	39	29	164	116	68
Дисперсія	101,0	210,0	169,0	135,0	1730,0	1320,0	569,0
Стандартне .відхилення	10,0	14,5	13,0	11,6	41,6	36,3	23,9
$Stat_{Kolmogorov-Smirnov}$	0,125	0,164	0,271	0,403	0,189	0,27	0,308
2021-2035 рр.							
Середнє, P = 95 %	48,9±5,3	28,9±5,4	17,7±6,3	7,6±5,0	103,1±10,4	54,2±13,1	25,3±10,6
Мінімум	26	7	0	0	56	7	0
Максимум	62	53	39	26	125	87	57
Дисперсія	89,7	94,7	129,0	80,0	355,2	561,0	368,0
Стандартне .відхилення	9,5	9,7	11,4	8,9	18,8	23,7	19,2
StatKolmogorov-Smirnov	0.239	0.212	0.152	0.281	0.157	0.146	0.182
Порівняння середніх двох періодів							

Дисперсія1/дисперсія2	1,13	2,22	1,31	1,69	4,87	2,35	1,55
t-статистика	-0,58	-0,98	-1,57	-0,07	-1,16	-1,04	-0,92
t крит. двостороннє	2,05	2,05	2,05	2,05	2,09	2,05	2,05
p - рівень	0,57	0,34	0,13	0,94	0,26	0,31	0,37
d Коена	0,22	0,36	0,57	0,03	0,43	0,39	0,34

У третьому розділі було проведено ґрунтовне дослідження методик оцінювання пожежної небезпеки на основі метеорологічних показників, з акцентом на показник пожежної небезпеки за В. Г. Нестеровим (ППН) та його модифікації, а також Канадський індекс FWI (Fire Weather Index). Розрахунки здійснювалися з використанням архівних і прогностичних даних глобальних кліматичних моделей CORDEX та GCM (зокрема моделей ERA5 і MPI), що дало змогу оцінити не лише поточний стан пожежної небезпеки, а й її можливу динаміку в майбутньому (до 2035 року).

1. Модифікації індексу ППН:

Розглянуто чотири модифікації індексу ППН — базову (AvgN), з урахуванням вологості поверхні (AvgNV), з поправками на гігроскопічну вологість (AvgNG) і варіант В. А. Балабуха (AvgNB), який включає вплив опадів і швидкості вітру. У процесі порівняльного аналізу встановлено, що методика AvgNG є найменш придатною до умов Українського Полісся, оскільки в умовах високої вологості повітря вона часто генерує від’ємні значення, що унеможливлює адекватну оцінку ризику. Найбільш адаптованими до регіональних кліматичних умов виявилися методики AvgNV та AvgNB.

2. Сезонна та річна динаміка пожежної небезпеки:

Дослідження середньомісячної та середньорічної динаміки ППН за період 2006–2020 років виявило чіткий сезонний максимум пожежної небезпеки в літні місяці (червень–серпень). Це збігається з періодом найвищих температур і найнижчої відносної вологості повітря, що сприяє інтенсивному висиханню рослинності, зокрема трав'яного покриву, який особливо вразливий до займання.

3. Вплив погодних чинників:

Проаналізовано вплив основних метеорологічних змінних (температури повітря, дефіциту точки роси, опадів та швидкості вітру) на формування пожежонебезпечних умов. Врахування цих чинників у модифікованих формулах ППН (зокрема в AvgNB) забезпечує кращу відповідність результатів реальним кліматичним умовам регіону.

4. Порівняння ППН і FWI:

Виконано порівняльний аналіз показників ППН і FWI, розрахованих за даними моделей ERA5 і MPI для періоду 2006–2035 років.

5. Статистична обробка результатів:

Аналіз даних свідчить про те, що в період 2006–2020 років спостерігалося поступове зростання кількості днів з пожежною небезпекою високого та надзвичайного рівнів (класи 4 і 5). Разом із тим, згідно з прогнозом на 2021–2035 роки, загальна кількість таких днів суттєво не зросте. Проведена t-статистична перевірка не виявила значущих відмінностей між двома часовими періодами ($t < t_{крит}$, $p > 0{,}05$), що підтверджено також низькими значеннями ефекту Коена (до 0,57 для FWI та до 0,2 для ППН).

Результати дослідження свідчать про те, що обидві методики — ППН та FWI — можуть бути використані як інструменти моніторингу й прогнозування пожежної небезпеки в Українському Поліссі. Водночас FWI,

розрахований за моделями CORDEX, може мати завищені значення внаслідок недостатньої адаптації моделі до регіональних кліматичних особливостей. Тому при практичному застосуванні FWI рекомендовано проводити калібрування на основі локальних даних.

Проведений у розділі 3 аналіз підтвердив доцільність використання як національних (ППН), так і міжнародних (FWI) індексів для оцінки пожежної небезпеки. Запропоновані адаптовані методики враховують специфіку клімату та рослинності Українського Полісся й можуть бути ефективно застосовані в системах раннього попередження та управління ризиками ландшафтних пожеж, зокрема в Чорнобильській зоні відчуження. Для підвищення точності моделей доцільно подальше вдосконалення індексів з урахуванням реальних даних про пожежі та розширення бази польових спостережень.

ВИСНОВКИ

У межах дипломної роботи проведено комплексне дослідження пожежонебезпечних умов у Чорнобильській зоні відчуження (ЧЗВ) з урахуванням фізико-географічних, кліматичних, біологічних і радіоекологічних чинників. Основна увага приділялася оцінці рівня пожежної небезпеки за допомогою різних метеорологічних індексів, а також виявленню тенденцій змінцих показників у контексті сучасних кліматичних змін.

У **першому розділі** розкрито особливості Чорнобильської зони як території з підвищеним рівнем ризику виникнення лісових і трав'яних пожеж. Встановлено, що специфічні ландшафтні, кліматичні та екологічні умови ЧЗВ — зокрема, щільність лісового покриву, характер рослинності та наявність радіонуклідного забруднення — формують складне природно-техногенне середовище, де пожежі можуть не лише завдавати шкоди екосистемам, а й нести радіоекологічну загрозу для довколишніх регіонів. Також наголошено на важливості системного моніторингу як одного з основних інструментів зниження пожежного ризику в ЧЗВ.

У **другому розділі** було розглянуто теоретичні основи формування пожежонебезпечних умов погоди. Досліджено метеорологічні фактори (температура повітря, вологість, вітер, опади), що безпосередньо впливають на ризик займання. Проаналізовано сучасні методи оцінки пожежної небезпеки, зокрема індекси ППН (по Нестерову), FWI (канадський індекс), а також їхмодифікації. Наведено класифікації, шкали градацій та методичні підходи, що використовуються в міжнародній та українській практиці.

Особливу увагу в цьому розділі було приділено методології дослідження — побудові багаторівневого підходу до аналізу пожежонебезпечних умов, що включав використання реаналізу метеоданих

(ERA5), кліматичних прогнозів (MPI, CORDEX), а також обчислювальних алгоритмів у середовищі MapBasic.

У **третьомурозділі** виконано розрахунок індексу пожежної небезпеки за методикою В. Г. Нестерова та його вдосконаленими модифікаціями, що враховують гігроскопічність горючих матеріалів, опади та швидкість вітру. Результати обчислень свідчать про сезоне зростання пожежної небезпеки в літній період, що збігається з періодом максимального висихання рослинного покриву. Здійснено порівняння середньомісячних значень ППН у межах 2006–2020 рр., а також прогнозних змін до 2035 р.

Було проведено також зіставлення ППН із індексом FWI. Аналіз показав, що в окремі роки періоду 2021–2035 рр. збільшується частота днів з високим і надзвичайним рівнем пожежної небезпеки (класи 4 і 5), хоча загалом статистично значущих змін у порівнянні з періодом 2006–2020 рр. не виявлено (t-статистика < t крит., p > 0,05, низькийефектКоена). Методика ППН у модифікації В. А. Балабуха показала найвищу чутливість до змін метеорологічних умов і найбільшу відповідність локальним кліматичним особливостям регіону.

Основні результати роботи:

- Встановлено, що Чорнобильська зона залишається потенційно небезпечною територією з точки зору ймовірності виникнення природних пожеж.
- Індекс ППН і його адаптовані варіанти дозволяють адекватно оцінювати пожежонебезпеку в умовах Полісся.
- Канадський індекс FWI може застосовуватись у поєднанні з ППН, протее потребує адаптації до локального клімату для уникнення завищення результатів.

- Застосування кліматичних моделей (MPI, ERA5) дало змогу не лише проаналізувати історичні умови, а й здійснити прогнозну оцінку пожежної небезпеки до 2035 року.
- Зафіксовано тенденцію до збільшення кількості днів з классом пожежної небезпеки 4–5, що вимагає підвищеної уваги до превентивних заходів.

СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила пожежної безпеки в лісах України. Затверджено наказом Міністерствазахистудовкілля та природнихресурсівУкраїнивід 27.12.2021 № 770. Доступно за посиланням: https://forest.gov.ua/storage/app/sites/8/uploaded-files/pravylapozhezhnoibezpeky.doc

2. Довгаль С. О., Матвіїв М. Я. (2021). Аналізвпливуметеорологічних умов на виникненнялісовихпожеж в Україні. Науковийвісник НЛТУ України, т. 31, № 5, с. 76–82. URL: https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/view/2330

3. Агайяр Є. В. (2020). Спеціалізованіпрогнозинебезпечнихявищ погоди. Одеса: Одеськийдержавнийекологічнийуніверситет. URL: https://eprints.library.odeku.edu.ua/9400/1/Агайяр%20Є.%20В.%20Спеціалізовані%20прогнози%20небезпечних%20явищ%20погоди.pdf

4. Чорнобильськийрадіаційно-екологічнийбіосферний заповідник — https://zapovidnyk.org.ua

5. Науковіпраці ДАЗВ — http://dazv.gov.ua

6. Ярошенко Ю.Г. (2017). Екологічниймоніторинг у зонівідчуження. Вісникекологічноїбезпеки, №2

7. IAEA (2021). Environmental remediation in the Chernobyl Exclusion Zone.

8. Ecoaction (2020). Analysis of forest fires in the Chernobyl Exclusion Zone and radiation risks.

9. OECD NEA (2021). Chernobyl: Agricultural and Environmental Impacts. https://www.oecd-nea.org

10. USDA Forest Service (2020). Fire Risk in Contaminated Forests. https://www.usda.gov

11. ScienceDirect (2014). Wildfire Radioecological Consequences. https://www.sciencedirect.com

12. The Guardian (2020). Radiation Spikes in Chernobyl Fire. https://www.theguardian.com

13. IAEA (2020). Radiological Consequences of Forest Fires in the CEZ.

14. Ecoaction (2020). Forest Fires and Radiation Risk in Chornobyl.

15. Yoschenko et al. (2016). Wildfire resuspension of radionuclides.

16. Copernicus EMS: https://emergency.copernicus.eu

17. HYSPLIT Model. NOAA Air Resources Laboratory: https://www.ready.noaa.gov

18. SaveDnipro. Інформаційніаналітичнізвіти 2020–2022 рр.

19. Укргідрометцентр. Щоденнаінформація про рівеньрадіаційного фону.

20. NASA FIRMS – https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov

21. Sentinel Hub EO Browser – https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser

22. ДСП «Екоцентр» – https://dsp-ecocentre.gov.ua

23. SaveDnipro та EcoCity – платформигромадськогомоніторингу

24. Звіти ДСНС України та МіністерствазахистудовкіллюУкраїни (2020–2024 рр.)

25. ДСП «Екоцентр». Звіти про радіоекологічнуситуацію (1992–2022 рр.)

26. SaveDnipro. Аналітичнідані про якістьповітряпід час пожеж 2020 року.

27. CopernicusEMS. Супутниковізнімки з пожеж у ЧЗВ (2015–2020).

28. МАГАТЕ (IAEA). Звіти про впливлісовихпожеж у зонівідчуження.

29. HYSPLITModelReports (NOAA, 2020).