

УДК 622.457:519.8

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.250226.102.1214

## КОМПЛЕКСНИЙ СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СЕЗОННОЇ ДИНАМІКИ ПОЖЕЖ З УРАХУВАННЯМ КЛІМАТИЧНИХ ЧИННИКІВ

РУСАКОВА Т. І.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,

ВОЙТЕНКО Ю. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук,

ДОЛЖЕНКОВА О. В.<sup>3</sup>, канд. техн. наук, с. н. с.,

ЗОЛОТЬКО О. В.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.,

ЛЕВИЦЬКА О. Г.<sup>5</sup>, канд. техн. наук, доц.

<sup>1\*</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [rusakovati1977@gmail.com](mailto:rusakovati1977@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

<sup>2</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [Juliya.voytenko.1983@gmail.com](mailto:Juliya.voytenko.1983@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0819-3794

<sup>3</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Науки, 72, 49000, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 908-59-89, e-mail: [dolena.2017@gmail.com](mailto:dolena.2017@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7970-8110

<sup>4</sup> Кафедра безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна, 72, 49000, Дніпро, Україна, e-mail: [zltkelen@gmail.com](mailto:zltkelen@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

<sup>5</sup> Кафедра екології та охорони навколишнього середовища, Дніпровський державний технічний університет, вул. Дніпробудівська, 2, 51918, Кам'янське, Україна, e-mail: [LLevi@ukr.net](mailto:LLevi@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2598-3651

**Анотація. Постановка проблеми.** Зростання кількості пожеж у Дніпропетровській області становить серйозну екологічну та соціально-економічну загрозу. Існує потреба у поглибленому аналізі їх сезонної динаміки з урахуванням метеорологічних чинників для ефективного прогнозування та запобігання пожежам. **Мета роботи** – здійснити комплексний статистичний аналіз пожеж у Дніпропетровській області за останні роки, визначити статистично значущі факторні змінні, а також розробити математичну модель для прогнозування пожеж з урахуванням міжрічної та сезонної активності, а також природно-кліматичних чинників. **Методика.** У дослідженні застосовано методи однофакторного та двофакторного дисперсійного аналізу для виявлення взаємодії між факторами «місяць» і «рік», а також методи прогнозування за моделлю ETS (експоненційного згладжування), яка враховує сезонність. Для побудови довгострокових прогнозних моделей щодо кількості пожеж використано методи кореляційно-регресійного аналізу. **Наукова новизна.** Здійснено статистичний аналіз пожежної активності у Дніпропетровській області з урахуванням як міжрічної, так і внутрішньорічної (сезонної) варіації на основі даних за 2020–2024 рр. та частково 2025 р. За допомогою двофакторного дисперсійного аналізу без повторень уточнено природу варіацій у кількості пожеж, які не були виявлені при однофакторному підході. Побудовано прогноз кількості пожеж на 2025 рік з використанням ETS-моделі, що показує задовільну збіжність за перші 4 місяці 2025 року. Запропоновано поділ річного циклу на три кліматично однорідні групи місяців для кореляційно-регресійного аналізу, щоб виявити специфіку впливу погодних чинників у кожному сезоні. Встановлено числові залежності між кількістю пожеж та конкретними метеорологічними параметрами (температурою, вологістю, опадами, швидкістю вітра) для кожної групи місяців. **Практична значущість.** Отримані результати можуть бути використані органами місцевого самоврядування, ДСНС та екологічними службами для підвищення ефективності запобігання та реагування на пожежі в Дніпропетровській області. Побудовані прогнозні моделі дають змогу заздалегідь оцінювати ймовірну кількість пожеж у різні періоди року та за різних погодних умов, що сприяє оптимізації розподілу ресурсів, плануванню профілактичних заходів, інформуванню та цивільному захисту населення. **Висновки.** Пожежна активність у Дніпропетровській області демонструє чітко виражену сезонну структуру з піками у весняно-літній період. Двофакторний дисперсійний аналіз показав статистично значущу взаємодію між роком та місяцем, що свідчить про сезонну зміну упорядкованих років. Побудована ETS-модель забезпечила задовільну точність прогнозу кількості пожеж на 2025 рік. Встановлено, що метеорологічні чинники по-різному впливають на частоту пожеж у різні сезони року, що підтверджено кореляційно-регресійним аналізом.

**Ключові слова:** пожежна безпека; цивільний захист; прогнозна математична модель; дисперсійний та кореляційно-регресійний аналіз; ETS-модель; природні ризики

## COMPREHENSIVE STATISTICAL ANALYSIS AND FORECASTING OF SEASONAL FIRE DYNAMICS CONSIDERING CLIMATIC FACTORS

RUSAKOVA T.I.<sup>1\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
VOYTENKO J.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.)*,  
DOLZHENKOVA O.V.<sup>3</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Sen. Res.*,  
ZOLOTKO O.V.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
LEVYTSKA O.H.<sup>5</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: [rusakovati1977@gmail.com](mailto:rusakovati1977@gmail.com), ORCID ID: 0000-0001-5526-3578

<sup>2</sup> Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: [Juliya.voytenko.1983@gmail.com](mailto:Juliya.voytenko.1983@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-0819-3794

<sup>3</sup> Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (050) 908-59-89, e-mail: [dolena2017@gmail.com](mailto:dolena2017@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7970-8110

<sup>4</sup> Department of Life Safety, Oles Honchar Dnipro National University, 72, Haharin Ave., Dnipro, 49010, Ukraine, e-mail: [zltkelena@gmail.com](mailto:zltkelena@gmail.com), ORCID ID: 0000-0003-2482-7574

<sup>5</sup> Department of Ecology and Environmental Protection, Dniprovsky State Technical University, 2, Dniprobudivska str., Kamianske, 51918, Ukraine, e-mail: [LLevi@ukr.net](mailto:LLevi@ukr.net), ORCID ID: 0000-0002-2598-3651

**Abstract. Problem statement.** The increase in the number of fires in the Dnipropetrovsk region under climate change conditions poses a serious environmental and socio-economic threat. There is a need for an in-depth analysis of their seasonal dynamics, taking into account meteorological factors, to enable effective forecasting and fire prevention. **The purpose of the article** is to conduct a comprehensive statistical analysis of fires in the Dnipropetrovsk region in recent years, identify statistically significant factor variables, and develop a mathematical model for fire forecasting, taking into account interannual and seasonal activity as well as natural and climatic factors. **Methodology.** The study employs one-way and two-way analysis of variance to identify interactions between the factors “month” and “year”, as well as forecasting methods based on the ETS (Exponential Smoothing) model, which accounts for seasonality. Correlation and regression analysis methods were used to construct predictive models for the number of fires. **Scientific novelty.** A systematic analysis of fire activity in the Dnipropetrovsk region was carried out, taking into account both interannual and intra-annual (seasonal) variability, based on data from 2020 to 2024 and partially from 2025. Using a two-way ANOVA without replication, the nature of variations in the number of fires – undetected by the one-way approach – was clarified. A forecast for the number of fires in 2025 was developed using the ETS model. A division of the annual cycle into three climatically homogeneous groups of months was proposed for correlation-regression analysis, aiming to reveal the specific impact of weather factors in each season. Numerical relationships were established between the number of fires and specific meteorological parameters (temperature, humidity, precipitation, wind speed) for each group of months. **Practical significance.** The obtained results can be used by local self-government bodies, the State Emergency Service, and environmental agencies to enhance the effectiveness of fire prevention and response in the Dnipropetrovsk region. The developed forecasting models make it possible to estimate the probable number of fires in advance for different periods of the year and under various weather conditions, which facilitates the optimization of resource allocation, planning of preventive measures, public information, and civil protection. **Conclusions.** Fire activity in the Dnipropetrovsk region demonstrates a clearly defined seasonal pattern, with peaks occurring during the spring and summer months. Two-way ANOVA revealed a statistically significant interaction between year and month, indicating changes in seasonal fire patterns over time. The constructed ETS model provided satisfactory accuracy in forecasting the number of fires for 2025. It was established that meteorological factors affect fire frequency differently across seasons, as confirmed by correlation-regression analysis.

**Keywords:** *fire safety; civil protection; predictive mathematical model; analysis of variance and correlation-regression analysis; ETS model; natural hazards*

**Постановка проблеми.** Антропогенний вплив та кліматичні зміни виступають постійними чинниками, що впливають на кількість пожеж як у світі загалом, так і зокрема в Дніпропетровській області. Спостерігається посилення впливу таких природно-кліматичних чинників, як температура, вологість повітря, кількість опадів, швидкість вітру, на формування

пожежної небезпеки, що зумовлює потребу у системному дослідженні динаміки цих явищ. У зв'язку з цим виникає необхідність у комплексному статистичному аналізі сезонних і міжрічних коливань пожежної активності з метою виявлення закономірностей її змін.

Актуальним завданням є виявлення статистично значущих факторів, що

впливають на частоту пожеж, а також розробка математичних моделей для короткострокового прогнозування кількості пожеж в екосистемах на найближчий рік та довгострокового – на наступні два-три роки. Важливу роль відіграють моделі, які враховують сезонність, річні зміни та кліматичні параметри, оскільки вони дозволяють не лише аналізувати дані з попередніх періодів, а й оперативно оцінювати потенційні ризики як на поточний момент, так і на майбутнє.

Очікувані результати дослідження можуть бути використані органами цивільного захисту, місцевого самоврядування та природоохоронними структурами для вдосконалення заходів запобігання й реагування на пожежі в екосистемах, а також для підвищення рівня екологічної безпеки в регіоні.

**Аналіз останніх досліджень.** Останні наукові роботи вказують на стійку тенденцію зростання частоти та інтенсивності пожеж у світі в екосистемах, зокрема в Україні, що можна пов'язати з глобальними змінами клімату. Зокрема, в роботі [1] досліджують пожежну активність у регіоні Українського Полісся на основі даних 2001–2023 років, встановлюючи зв'язок між зменшенням вологості та підвищенням температури. Це вказує на те, що зміна клімату є значним чинником, що впливає на пожежну ситуацію в регіоні.

Міжнародні дослідження підтверджують подібні тенденції у зв'язку між кліматом та частотою пожеж. В роботі [2] вивчається вплив кліматичних змін на силу та тривалість пожеж і підкреслюється, що зменшення кількості дощів та підвищення температури сприяють збільшенню частоти та інтенсивності пожеж у різних частинах світу. Водночас, результати дослідження [3] показують, що зміни клімату призводять не лише до збільшення кількості пожеж, а й до зростання економічних втрат і смертності внаслідок диму від пожеж у США.

Глобальне потепління також створює сприятливі умови для збільшення обсягів викидів вуглекислого газу CO<sub>2</sub>, твердих часток PM<sub>2.5</sub> та інших продуктів горіння, що

утворюються внаслідок природних пожеж. На основі Глобальної бази даних про викиди від пожеж (GFED) автори роботи [4] акцентують увагу на статистичних залежностях між змінами температури та частотою глобальних природних пожеж. Ці висновки мають важливе значення для прогнозування пожеж в екосистемах в умовах зміни клімату та для розробки політики щодо скорочення викидів.

Ще одне важливе дослідження [5] описує важкі лісові пожежі в Канаді у 2023 році. В ньому наголошуючи на тому, що зміни клімату значно підвищили інтенсивність і поширення пожеж. Прогнозується, що така тенденція буде зберігатися і у майбутньому, зокрема через підвищення середньорічних температур і зменшення рівня опадів.

Згідно з даними, представленими в доповіді [6], пожежі в Південній Кореї стали вдвічі більш імовірними внаслідок кліматичних змін. Це підтверджує висновки міжнародних досліджень щодо зміщення просторового розподілу та сезонності пожеж під впливом глобального потепління. Така тенденція свідчить про необхідність змін в управлінні ризиками відповідно до нових кліматичних реалій.

З огляду на ці глобальні тенденції, надзвичайно важливим є розуміння місцевих особливостей, які можуть включати специфічні кліматичні умови та соціально-економічні чинники. Так, дослідження [7] показує, що співпадіння пожежних сезонів у різних регіонах світу може призвести до глобальних катастрофічних подій.

В публікаціях [8–10] показано, що зміни клімату значно впливають на пожежну активність. В роботі [8] представлено глобальну картину сезонності пожеж і зміщення сезонних піків. У дослідженні [9] наголошується, що подальше потепління посилить нові режими пожеж, що матиме значні наслідки для екосистем та суспільства.

Одночасно із закордонними дослідженнями в Україні є стратегічний документ [11], що визначає напрямки енергетичної та кліматичної політики до 2030 року. Він містить аналіз ризиків, пов'язаних із змінами

клімату, включаючи зростання частоти та інтенсивності пожеж. Цей документ є основою для розробки моделей, які дозволяють краще прогнозувати пожежну активність та розробляти необхідні заходи для мінімізації ризиків у майбутньому.

**Мета** даного дослідження полягає в комплексному статистичному аналізі пожежної активності в Дніпропетровській області та розробці інструментів для короткострокового та довгострокового прогнозування, які враховують вплив кліматичних умов і сезонних коливань.

**Опис об'єкта.** Для досягнення даної мети поставлено наступні завдання:

- провести аналіз структури та сезонності пожежної активності за даними 2020–2024 років і частково 2025 року;

- здійснити оцінку впливу метеорологічних параметрів (температури повітря, вологості, кількості опадів, швидкості вітру) на частоту виникнення пожеж;

- виконати статистичне моделювання (зокрема, із застосуванням ETS-моделі та дисперсійного аналізу) з метою виявлення закономірностей у динаміці пожеж та короткострокового прогнозування;

- розробити кореляційну математичну модель для довгострокового прогнозування кількості пожеж на рівні двох-трьох років з урахуванням сезонних, міжрічних та погодних чинників.

**Методи дослідження.** У дослідженні застосовано комплекс статистичних методів аналізу пожежної активності в Дніпропетровській області за період 2020 – 2024 років. Для дослідження сезонної та міжрічної динаміки було використано: описову статистику для узагальнення основних характеристик вибірки; дисперсійний аналіз (ANOVA) для виявлення відмінностей у частоті пожеж між різними сезонами та роками; моделі часових рядів, зокрема ETS-модель (Error-Trend-Seasonality) для короткострокового прогнозування пожежної активності з урахуванням сезонних коливань; кореляційно-регресійний аналіз для визначення взаємозв'язку між кількістю пожеж та погодними показниками

(температурою повітря, кількістю опадів, вологістю, швидкістю вітру) та створення математичної моделі для довгострокового прогнозування; візуалізаційні методи (графіки, діаграми), для наочного представлення динаміки та тенденцій.

**Методика дослідження.** Для аналізу загальної кількості пожеж у Дніпропетровській області використано статистичні дані Головного управління ДСНС у Дніпропетровській області [12] та сервісу SoweEcoBot за 2020–2024 роки [13]. На основі середніх значень за місяцями побудовано діаграму з вусами (boxplot), яка відображає розподіл кількості пожеж у кожному місяці протягом досліджуваного періоду (рис. 1). Цей тип графіка демонструє: середнє значення (позначене хрестиком), медіану (лінія в середині «коробки»), міжквартильний розмах (межі коробки), а також мінімальні й максимальні значення (вуса – тонкі лінії за межами коробки).

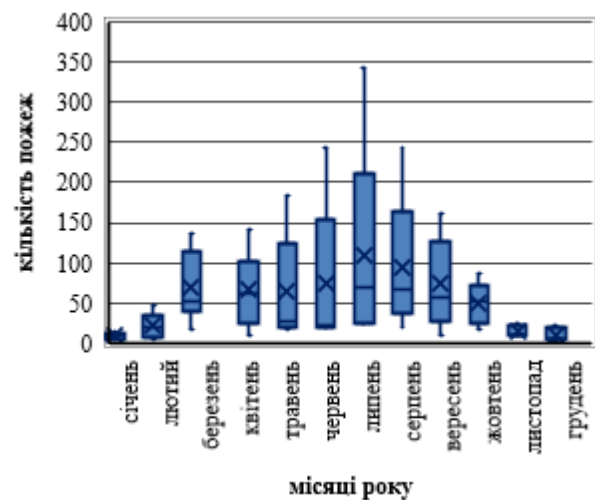


Рис. 1. Динаміка зміни загальної кількості пожеж впродовж 2020–2024 років

Динаміка зміни кількості пожеж за місяцями протягом п'яти років свідчить про загальні сезонні тенденції. Найменша кількість пожеж спостерігається у зимові місяці – січень, лютий, а також пізньої осені – у листопаді та грудні. Різке зростання починається з березня й продовжується навесні, досягаючи піку влітку. Найвища кількість пожеж фіксується в липні, з також високими показниками у червні та серпні.

Восени, починаючи з вересня, кількість пожеж поступово знижується.

Рівень варіативності та розкиду даних також змінюється залежно від сезону. Широкі «ящики» на діаграмі в літні місяці, особливо в липні, свідчать про значну міжрічну мінливість кількості пожеж. Довгі «вуса» вказують на великі коливання значень. Натомість у зимові місяці спостерігається дуже низька варіативність: кількість пожеж залишається стабільно низькою, без значних відхилень. Також помітно, що в літній період середні значення та медіани, як правило, вищі, ніж в інші місяці, що свідчить про підвищений ризик пожеж у цей сезон.

Сезонна варіація кількості пожеж зумовлена поєднанням природно-кліматичних та антропогенних чинників. У теплий період року, переважно влітку, пожежна активність суттєво зростає через підвищення температури повітря, зниження атмосферної вологості, тривалі сухі періоди, а також внаслідок активнішого використання відкритого вогню на природних територіях. Восени та взимку, коли спостерігається вища вологість і зменшується рівень рекреаційної активності населення, ризик виникнення пожеж є мінімальним.

Оскільки в дослідженні аналізується кілька груп – 12 місяців протягом 5 років, виникає потреба з'ясувати, чи існують статистично значущі відмінності між їхніми середніми значеннями. З цією метою було застосовано дисперсійний аналіз (ANOVA), який дозволяє оцінити вплив окремих факторів (місяця та року) на залежну змінну (кількість пожеж), а також виявити суттєві відмінності між групами й можливу взаємодію між цими факторами. Аналіз охоплює дані про кількість пожеж у Дніпропетровській області за період 2020–2024 рр. та перші чотири місяці 2025 року.

На першому етапі дослідження було застосовано однофакторний дисперсійний аналіз з метою перевірки наявності статистично значущих відмінностей у середніх значеннях кількості пожеж між роками 2020–2025. Нульову гіпотезу  $H_0$  сформульовано, як відсутність впливу

фактора «рік» на рівень пожежної активності. Основні результати аналізу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

#### Основні результати аналізу впливу фактора «рік»

| Показник           | Значення            |
|--------------------|---------------------|
| $F_{\text{стат.}}$ | 7,47                |
| $P_{\text{знач.}}$ | $1,8 \cdot 10^{-5}$ |
| $F_{\text{кр.}}$   | 2,374               |

Дисперсія у 2020 році (11308,6) є істотно вищою порівняно з іншими роками, що свідчить про значну варіацію кількості пожеж у межах цього року. В інших роках спостерігається нижчий рівень дисперсії, що вказує на більшу стабільність показників. Отримане значення  $F_{\text{стат.}} = 7,47$  перевищує критичне значення  $F_{\text{кр.}} = 2,374$  при рівні значущості  $\alpha = 0,05$ , що дозволяє зробити висновок про статистично значущу різницю між середніми значеннями кількості пожеж за роками. Крім того, рівень значущості  $P_{\text{знач.}} = 1,8 \cdot 10^{-5}$  значно менше за пороговий рівень 0,05, що підтверджує можливість відхилення нульової гіпотези  $H_0$ . Це свідчить про наявність статистично значущих відмінностей у середній кількості пожеж між досліджуваними роками.

На другому етапі дослідження було проведено однофакторний дисперсійний аналіз з метою перевірки наявності статистично значущих відмінностей у середніх значеннях кількості пожеж між місяцями. Основні результати аналізу наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

#### Основні результати аналізу впливу фактору «місяць»

| Показник           | Значення |
|--------------------|----------|
| $F_{\text{стат.}}$ | 1,58     |
| $P_{\text{знач.}}$ | 0,132    |
| $F_{\text{кр.}}$   | 1,978    |

Нульова гіпотеза  $H_0$  полягала у припущенні про відсутність впливу фактора «місяць» на рівень пожежної активності.

Результати однофакторного дисперсійного аналізу показали, що значення  $F_{\text{стат.}} = 1,58$  менше за критичне значення  $F_{\text{кр.}} = 1,978$ , а також  $P_{\text{знач.}} = 0,132$  більше за

встановлений рівень значущості  $\alpha = 0,05$ . Таким чином, нульова гіпотеза  $H_0$  не відхиляється, що свідчить про відсутність статистично значущих відмінностей у середній кількості пожеж між різними місяцями року. Це означає, що вплив місяця на кількість пожеж у даній вибірці є статистично незначущим. Хоча середні значення кількості пожеж у різні місяці (наприклад, у липні та серпні) можуть бути вищими, розкид даних усередині місяців є настільки великим, що загальна різниця між місяцями не є статистично достовірною.

На третьому етапі дослідження було застосовано двофакторний дисперсійний аналіз з метою оцінки, чи мають одночасно фактори «місяць» (календарний період) та «рік» (часовий період) статистично значущий вплив на середню кількість пожеж, а також для визначення наявності взаємодії між цими факторами (табл. 3).

Таблиця 3

**Основні результати аналізу впливу факторів «рік» та «місяць»**

| Джерело варіації | $F_{\text{стат.}}$ | $P_{\text{знач.}}$  | $F_{\text{кр.}}$ |
|------------------|--------------------|---------------------|------------------|
| місяці           | 2,62               | 0,011               | 2,01             |
| роки             | 11,43              | $1,9 \cdot 10^{-6}$ | 2,58             |

Результати двофакторного дисперсійного аналізу свідчать про статистично значущий вплив обох досліджуваних чинників, а саме місяця та року, на середню кількість пожеж.

Для фактора «місяць» отримано значення критерію Фішера  $F_{\text{стат.}} = 2,62$ , що перевищує критичне значення  $F_{\text{кр.}} = 2,01$  при рівні значущості  $\alpha = 0,05$ . Відповідне  $P_{\text{знач.}} = 0,011$ , що є меншим за обраний поріг значущості. Таким чином, нульова гіпотеза про відсутність впливу місяця на кількість пожеж відхиляється, що свідчить про наявність статистично значущих сезонних коливань у середньомісячній кількості пожеж. Це дозволяє припустити, що деякі місяці (переважно літні) є більш вразливими до виникнення пожеж порівняно з іншими періодами року.

Фактор «рік» також виявився статистично значущим:  $F_{\text{стат.}} = 11,43$ ,

$F_{\text{кр.}} = 2,58$ , тобто  $F_{\text{стат.}} > F_{\text{кр.}}$ ,  $P_{\text{знач.}} = 1,9 \cdot 10^{-6}$ , що свідчить про суттєві міжрічні варіації в середньому рівні пожежної активності. Це може бути пов'язано зі змінами кліматичних умов, наприклад, аномальною спекою або посухами, змінами в системі пожежної безпеки та з антропогенним навантаженням.

Загальна дисперсія в кількості пожеж на 24,3 % пояснюється місяцем (сезонністю), на 38,6 % – роком (часовим впливом), а 37,1 % складає залишкова дисперсія, тобто випадкові або невраховані фактори.

Таким чином, обидва чинники – рік та місяць мають значний внесок у варіацію кількості пожеж, що свідчить про необхідність врахування як сезонної, так і довгострокової часової динаміки при розробці заходів з пожежної профілактики та управління ризиками.

Результати одно- та двофакторного дисперсійного аналізу продемонстрували певні відмінності. Під час проведення однофакторного дисперсійного аналізу було перевірено, чи існують статистично значущі відмінності у середніх значеннях кількості пожеж між різними місяцями року. Аналіз показав, що при об'єднанні даних за всі роки (без урахування річного чинника), вплив місяця не виявився статистично значущим ( $P_{\text{знач.}} > 0,05$ ). Це може бути наслідком того, що міжрічні коливання настільки великі, що «приглушують» можливий сезонний ефект.

У двофакторному дисперсійному аналізі без повторень, де оцінювався вплив обох чинників, а саме року та місяця, було встановлено, що фактор «місяць» має статистично значущий вплив на кількість пожеж ( $P_{\text{знач.}} < 0,05$ ). Це пояснюється тим, що модель враховує окремий вплив року, а це дозволяє краще виокремити «чистий» сезонний ефект. Отже, сезонні коливання кількості пожеж є істотними, проте їх вплив стає статистично вираженим лише за умови врахування міжрічної варіації.

На наступному етапі дослідження, за допомогою функції Forecast.Ets.Confint, на основі методу експоненційного згладжування, було побудовано прогноз кількості пожеж на 2025 рік на основі

статистичних даних за 2020–2024 роки (рис. 2).

Отриманий графік дозволяє не лише оцінити очікувану кількість пожеж, але й визначити довірчий інтервал прогнозу з ймовірністю 95 %, що забезпечує високу

ймовірність потрапляння фактичних значень у межі прогнозу. У моделі враховано сезонність (інтервал 12 місяців), що підвищує її точність, оскільки вхідні дані мають річну циклічність (рис. 2)

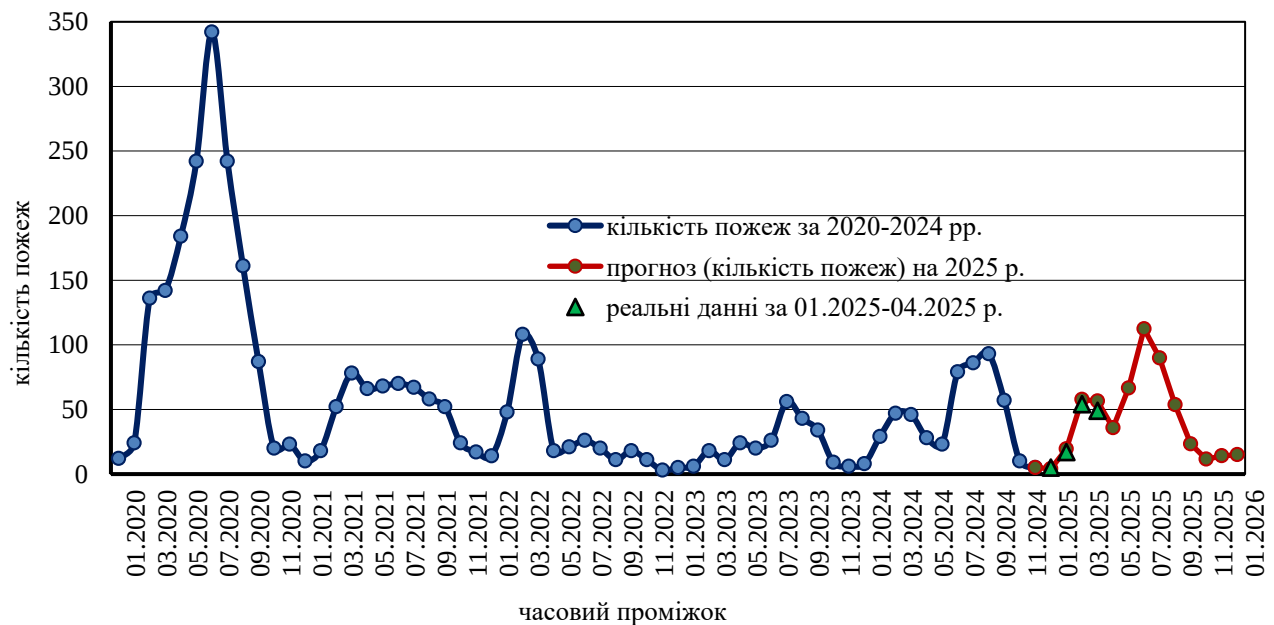


Рис. 2. Динаміка зміни кількості пожеж за 2020–2024 роки з урахуванням прогнозу на 2025 р.

Аналіз тенденції прогнозу на 2025 рік (червона лінія) демонструє чітко виражену сезонність, що відповідає динаміці попередніх років: зростання кількості пожеж навесні та влітку, спад – восени та взимку. У 2025 році прогнозується два помітних піки: перший – у квітні-травні (~60 випадків), другий і найвищий – у серпні (~110 випадків), що відповідає типовому літньому максимуму. Порівняння з фактичними даними за січень – квітень 2025 року (позначеними зеленими трикутниками) показує хорошу відповідність прогнозу: відносна похибка становить 6–15 %. Це свідчить про достатню точність ETS-моделі на короткострокову перспективу та підтверджує її надійність принаймні до кінця 2025 року.

Аналіз сезонності та циклічності підтверджує, що кількість пожеж з року в рік коливається в одних і тих самих часових проміжках, особливо у весняно-літній період, коли ризик зростає найбільше.

Це дає змогу завчасно підготуватися до пікових періодів ризику: розробити

профілактичні заходи, інформувати населення, планувати необхідні ресурси для забезпечення пожежної безпеки.

Водночас, незважаючи на загальний збіг прогнозу з фактичними даними, слід враховувати, що модель ETS не включає кліматичних змінних. Щоб врахувати такі фактори, як температура повітря, вологість, опади, швидкість вітру, які потенційно впливають на залишкову дисперсію у попередньому аналізі, необхідно перейти до множинного регресійного моделювання.

Попередній кореляційно-регресійний аналіз, що охоплював усі календарні місяці за 2020–2025 роки, виявив низькі значення коефіцієнтів кореляції та відсутність статистичної значущості, що свідчить про недоцільність побудови єдиної моделі для всього періоду без урахування сезонних відмінностей. Це зумовило необхідність поділу даних на окремі три групи для подальшого детальнішого аналізу.

Перша група – зимові місяці: листопад, грудень, січень і лютий.

Друга група – перехідні місяці: березень, квітень, жовтень.

Третя група – пожежонебезпечний літньо-осінній період: травень, червень, липень, серпень, вересень.

Кореляційний аналіз виявив ступінь і напрямок зв'язку між кількістю пожеж та різними кліматичними і часовими чинниками.

Для першої групи (листопад, грудень, січень, лютий) встановлено такі залежності. Сильна від'ємна кореляція між кількістю пожеж та: кількістю опадів ( $r = -0,67$ ), вологістю повітря ( $r = -0,59$ ), швидкістю вітру ( $r = -0,64$ ). Ці зв'язки свідчать про зменшення ймовірності виникнення пожеж за умов підвищеної вологості та метеорологічної нестабільності. Позитивна кореляція з температурою повітря ( $r = 0,61$ ), що відповідає характеру пожежної активності в цей період року. Помірна позитивна кореляція з місяцем року ( $r = 0,42$ ), яка відображає сезонну динаміку змін. Від'ємна кореляція з роком ( $r = -0,59$ ) може свідчити про тенденцію до зменшення кількості пожеж з часом, що може бути зумовлено погодними трендами або іншими факторами довготривалого впливу.

Рівняння множинної лінійної регресії, що описує залежність кількості пожеж  $y_1(x_i)$  для першої групи місяців від основних факторів впливу, таких як,  $x_1$  – місяця,  $x_2$  – температури,  $x_3$  – вологості,  $x_4$  – швидкості вітру,  $x_5$  – кількості опадів та  $x_6$  – року має наступний вигляд (1):

$$y_1(x) = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + a_5 \cdot x_5 + a_6 \cdot x_6, \quad (1)$$

де відповідні коефіцієнти регресії у рівнянні (1) мають значення:  $a_0 = 191,42$ ,  $a_1 = -0,71$ ,  $a_2 = 3,51$ ,  $a_3 = -2,21$ ,  $a_4 = 3,29$ ,  $a_5 = -0,24$ ,  $a_6 = -0,52$ .

Проведений регресійний аналіз показав, що всі включені фактори мають статистично значущий вплив на кількість пожеж ( $p < 0,05$ ). Зокрема, зростання температури повітря та швидкості вітру достовірно асоціюється зі збільшенням кількості пожеж. Зменшення вологості, опадів також

статистично значуще впливає на динаміку пожеж. Найбільший негативний ефект мають вологість і кількість опадів, що вказує на зниження ризику виникнення пожеж за умов підвищеної вологості. Швидкість повітряного потоку, навпаки, має позитивний вплив, що сприяє поширенню пожеж.

Значення множинного коефіцієнта кореляції  $R = 0,87$  свідчить про тісний зв'язок між результуючою змінною (кількістю пожеж) та факторами, такими як місяць, температура повітря, вологість, швидкість вітру, кількість опадів і рік.

Коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,76$  вказує, що приблизно 76 % варіації у кількості пожеж може бути пояснено обраними незалежними змінними, що є достатньо високим показником ефективності моделі. Скоригований коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,66$  свідчить про хорошу узгодженість моделі з емпіричними даними.

Стандартна помилка моделі становить 6,16 %, що показує середнє відхилення між фактичними та прогнозованими значеннями кількості пожеж.

Результати дисперсійного аналізу підтверджують статистичну значущість регресійної моделі: значення критерію Фішера  $F = 7,8$ ,  $p = 0,00061 < 0,001$ . Отже, модель є статистично значущою, а обрана сукупність факторних змінних справді має істотний вплив на кількість пожеж.

Кореляційний аналіз даних для другої групи місяців (березень, квітень та жовтень) засвідчив, що кількість пожеж зменшується зі зміщенням до пізніших місяців року  $r = -0,43$ , а також при збільшенні вологості повітря  $r = -0,65$  та кількості опадів  $r = -0,62$ . Водночас, серед чинників, що сприяють зростанню кількості пожеж, слід відзначити підвищення температури  $r = 0,41$  та особливо швидкість вітру  $r = 0,66$ , що є критичним для поширення вогню в природному середовищі.

Рівняння множинної лінійної регресії, що описує залежність кількості пожеж  $y_2(x_i)$  для другої групи місяців (березень, квітень, жовтень) від основних факторів впливу  $x_1$  –  $x_6$  має вигляд (2):

$$y_2(x) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5 \cdot x_5 + b_6 \cdot x_6, \quad (2)$$

де відповідні коефіцієнти регресії у рівнянні (2) мають значення:  $b_0 = -203,84$ ,  $b_1 = -9,06$ ,  $b_2 = 13,81$ ,  $b_3 = 5,99$ ,  $b_4 = 27,62$ ,  $b_5 = 0,69$ ,  $b_6 = -12,7$ .

Множинний лінійний регресійний аналіз показав, що для коефіцієнтів  $b_1 - b_6$  рівень значущості  $p$  знаходиться в межах від 0,001 до 0,05, що свідчить про статистично значущий вплив цих змінних на кількість пожеж. Крім того, спостерігається зменшення кількості пожеж з роками  $b_6 = -12,7$ . Отримані результати узгоджуються з логічними припущеннями щодо чинників, які сприяють виникненню або стримуванню пожеж. Значення коефіцієнта множинної кореляції  $R = 0,914$  говорить про наявність сильної позитивної кореляції між незалежними змінними та залежною змінною. Значення коефіцієнта детермінації  $R^2 = 0,836$  означає, що приблизно 83,6 % варіації у залежній змінній пояснюється моделлю, що є свідченням її високої ефективності. Скориговане значення  $R^2 = 0,747$  залишається на високому рівні, що свідчить про адекватність та обґрунтованість відібраних факторів у моделі. Стандартна похибка регресії дорівнює 13,98 % говорить про достатню точність моделі для практичного застосування.

Дисперсійний аналіз показав, що модель є статистично значущою: значення  $F = 9,34$  за  $p = 0,00087$ , що менше 0,05.

З огляду на наведене, побудована модель (2) для другої групи місяців є статистично надійною, і може бути використана для подальших прогнозів або оцінки впливу окремих змінних на досліджуване явище.

Проведений кореляційний аналіз за період з травня по серпень показав, що найбільший вплив на кількість пожеж мають швидкість вітру  $r = 0,73$ , місяць  $r = 0,64$  та температура повітря  $r = 0,43$ . Зі збільшенням опадів кількість пожеж зменшується  $r = -0,43$ , що узгоджується з очікуваннями. Також спостерігається зниження кількості пожеж у динаміці за роками  $r = -0,64$ .

Рівняння множинної лінійної регресії, що описує залежність кількості пожеж  $y_3(x_i)$  для третьої групи місяців від основних факторів впливу  $x_1 - x_6$  має вигляд (3):

$$y_3(x) = c_0 + c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 + c_4 \cdot x_4 + c_5 \cdot x_5 + c_6 \cdot x_6, \quad (3)$$

де відповідні коефіцієнти регресії у рівнянні (3) мають значення:  $c_0 = -1613,71$ ,  $c_1 = 50,86$ ,  $c_2 = 35,49$ ,  $c_3 = 4,54$ ,  $c_4 = 99,19$ ,  $c_5 = 2,48$ ,  $c_6 = -22,39$ .

Множинний регресійний аналіз показав, що кількість пожеж зростає зі збільшенням температури повітря  $c_2 = 35,49$ ,  $p = 0,003$ , швидкості вітру  $c_4 = 99,19$ ,  $p = 0,022$  та місяця  $c_1 = 50,86$ ,  $p = 0,018$ , що вказує на більшу частоту пожеж у літні місяці. Помірний позитивний, але незначущий зв'язок спостерігається також з вологістю  $p \approx 0,051$  та кількістю опадів  $p \approx 0,052$ . Всі ці фактори разом забезпечують статистично значущу модель.

Множинний коефіцієнт кореляції  $R = 0,82$  свідчить про сильну кореляцію між факторними змінними та результуючою змінною.  $R^2 = 0,673$  вказує на те, що 67 % варіації результату моделі можна пояснити використаними змінними. Це свідчить про хорошу прогностичну здатність моделі. Нормований  $R^2 = 0,564$  підтверджує, що модель може пояснити близько 56 % варіації, з урахуванням достатньо великої кількості змінних у моделі. Це означає, що факторні змінні дійсно важливі. Стандартна помилка регресії 16,51 % є помірною, що свідчить про достатню точність прогнозів.

Дисперсійний аналіз також підтвердив статистично значущий вплив факторних змінних на результат. Обчислене значення  $F$ -критерію становить 6,17 при рівні значущості  $p = 0,0012 < 0,01$ . Це свідчить про те, що побудована регресійна модель є адекватною та добре описує варіацію кількості пожеж під впливом досліджуваних чинників.

**Наукова новизна та практична цінність.** Проведено комплексне дослідження впливу часових і кліматичних факторів на кількість пожеж із розподілом

даних за сезонними групами. Показано недоцільність застосування єдиної моделі для всього року без урахування сезонності. Побудовано окремі регресійні моделі для кожної групи місяців, що дозволили виявити різні чинники, які впливають на кількість пожеж. Запропоновано застосування ETS-прогнозування з урахуванням сезонної динаміки.

Результати дослідження дозволяють покращити прогнозування пожеж, узгодити профілактичні заходи до сезонних особливостей, а також більш ефективно планувати ресурси екстрених служб. Виявлені залежності можуть використовуватись для моделювання регіональної пожежної небезпеки з урахуванням погодних умов.

### Висновки

1. Проведено статистичний аналіз впливу часових (місяць, рік) та метеорологічних (температура, вологість, опади, швидкість вітру) чинників на кількість пожеж за даними 2020–2024 років із урахуванням сезонної класифікації місяців.

2. Обґрунтовано через порівняння результатів одно- та двофакторного дисперсійного аналізу, що класичний однофакторний підхід без урахування міжрічної варіації не виявляє вплив сезонного чинника.

3. Використано метод експоненційного згладжування ETS, який дозволяє з високою ймовірністю прогнозувати очікувану кількість пожеж на найближчий рік.

4. Встановлено відмінності у характері впливу метеорологічних факторів на кількість пожеж у різних сезонних групах.

5. Побудовано окремі регресійні моделі пожежної активності для кожної групи місяців, що підвищує точність аналізу та прогнозування.

Прогнозні моделі пожежної активності можуть бути використані державними службами реагування на надзвичайні ситуації, органами місцевого самоврядування та природоохоронними структурами для розробки перспективних стратегій реагування на зміну клімату та екологічні загрози.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Boychenko S., Kuchm T., Karamushka V., Maidanovych N., Kozak O. Wildfires and Climate Change in the Ukrainian Polissia During 2001–2023. *Sustainability*. 2025. № 17 (5). Pp. 2223. URL: <https://doi.org/10.3390/su17052223>
2. Wasserman T. N., Mueller S. E. Climate influences on future fire severity: a synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States. *Fire Ecology*. 2023. № 19. P. 43. URL: <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00200-8>
3. Law B. E., Abatzoglou J. T., Schwalm C. R. et al. Anthropogenic climate change contributes to wildfire particulate matter and related mortality in the United States. *Communications Earth & Environment*. 2025. № 6. P. 336. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02314-0>
4. Jones M. W., Kelley D. I., Burton C. A. et al. State of Wildfires 2023–2024. *Earth System Science Data*. 2024. № 16. Pp. 3601–3685. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024>
5. Kirchmeier-Young M. C., Malinina E., Barber Q. E. et al. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada. *Climate and Atmospheric Science*. 2024. № 7. P. 316. URL: <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00841-9>
6. Stanway D. South Korea's deadly fires made twice as likely by climate change – researchers say. *Reuters*. 2025. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/cop/south-koreas-deadly-fires-made-twice-likely-by-climate-change-researchers-say-2025-04-30/>
7. Climate change increases the risk of simultaneous wildfires. *Helmholtz Centre for Environmental Research*. 2025. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/04/250428221659.htm>
8. Andrea A., Cabrera A. A., Schall E. et al. Strong and lasting impacts of past global warming on baleen whales and their prey. *Global Change Biology*. 2022. № 28. Pp. 2657–2677. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.16085>
9. Higuera P. E., Shuman B. N., Wolf K. D. Rocky Mountain subalpine forests now burning more than any time in recent millennia. *Significance Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021. № 118 (25). Pp. e2103135118. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2103135118>
10. Energy Community Secretariat. Draft National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030. 2023. URL: <https://www.energy-community.org>

12. Головне управління статистики в Дніпропетровській області. URL: <https://dp.dsns.gov.ua/operational-information/dovidka-za-dobu> (дата звернення : 30.03.2025)
13. SaveEcoBot. Дані з системи FIRMS від NASA. <https://www.saveecobot.com/analytics/fires> (дата звернення : 10.04.2025).

## REFERENCES

1. Boychenko S., Kuchm T., Karamushka V., Maidanovych N. and Kozak O. Wildfires and Climate Change in the Ukrainian Polissia During 2001–2023. Sustainability. 2025, no. 17 (5), p. 2223. URL: <https://doi.org/10.3390/su17052223>
2. Wasserman T.N. and Mueller S.E. Climate influences on future fire severity: a synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States. Fire Ecology. 2023, no. 19, p. 43. URL: <https://doi.org/10.1186/s42408-023-00200-8>
3. Law B.E., Abatzoglou J.T., Schwalm C.R. and al. Anthropogenic climate change contributes to wildfire particulate matter and related mortality in the United States. Communications Earth & Environment. 2025, no. 6, p. 336. URL: <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02314-0>
4. Jones M.W., Kelley D.I., Burton C.A. and al. State of Wildfires 2023–2024. Earth System Science Data. 2024, no. 16, pp. 3601–3685. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-16-3601-2024>
5. Kirchmeier-Young M.C., Malinina E., Barber Q.E. and al. Human driven climate change increased the likelihood of the 2023 record area burned in Canada. Climate and Atmospheric Science. 2024, no. 7, p. 316. URL: <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00841-9>
6. Stanway D. South Korea's deadly fires made twice as likely by climate change – researchers say. Reuters. 2025. URL: <https://www.reuters.com/sustainability/cop/south-koreas-deadly-fires-made-twice-likely-by-climate-change-researchers-say-2025-04-30/>
7. Climate change increases the risk of simultaneous wildfires. Helmholtz Centre for Environmental Research. 2025. URL: <https://www.sciencedaily.com/releases/2025/04/250428221659.htm>
8. Andrea A., Cabrera A.A., Schall E. and al. Strong and lasting impacts of past global warming on baleen whales and their prey. Global Change Biology. 2022, no. 28, pp. 2657–2677. URL: <https://doi.org/10.1111/gcb.16085>
9. Higuera P.E., Shuman B.N. and Wolf K.D. Rocky Mountain subalpine forests now burning more than any time in recent millennia. *Significance Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2021, no. 118 (25), pp. e2103135118. URL: <https://doi.org/10.1073/pnas.2103135118>
10. Energy Community Secretariat. Draft National Energy and Climate Plan of Ukraine 2025–2030. 2023. URL: <https://www.energy-community.org>
12. *Holovne upravlinnya statystyky v Dnipropetrovs'kiy oblasti* [Main Department of Statistics in Dnipropetrovsk Region]. Application date : 30.03.2025. URL: <https://dp.dsns.gov.ua/operational-information/dovidka-za-dobu> (in Ukrainian).
13. *SaveEcoBot. Dani z systemy FIRMS vid NASA* [SaveEcoBot. Data from the system FIRMS від NASA]. Application date : 10.04.2025. URL: <https://www.saveecobot.com/analytics/fires> (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 29.11.2025.