

УДК 504:574:630*43:004.91

DOI <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.6-57.28>

ДОСВІД МОНІТОРИНГУ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА КОНТИНЕНТАХ ЗАСОБАМИ ГІС

Сараненко І.І.

Херсонський державний університет
вул. Шевченка, 14, 76018, м. Івано-Франківськ
saranenkoinna@gmail.com

У статті аналізується динаміка поширення лісових пожеж на континентах та їх наслідки для навколишнього середовища, висвітлені перспективи використання інструментів геоінформаційних систем (ГІС) та технологій штучного інтелекту (ШІ) щодо прогнозування та запобігання їх виникненню.

Робота розглядає глобальні та регіональні аспекти проблеми, зокрема залежність масштабу пожеж від кліматичних та екологічних чинників. На основі даних NASA fire map, Global Forest Watch та ArcGIS Living Atlas та інших джерел виконаний моніторинг лісових пожеж у Північній та Південній Америці, Євразії, Австралії та Африці.

У період з червня по серпень 2024 року реєструвалися лісові пожежі, кліматичні умови та забруднення атмосфери за наступними показниками: кількість сповіщень; площа, га; вигорілих зелених насаджень, га; середня швидкість вітру; температура, °C; вологість повітря, %; опади, мм; CO, ppm; SO₂, мг/м³; маса пилу, мг/м³. Зафіксовано понад 61 тис. лісових пожеж, які знищили 154 млн. га землі та 23 млн. га лісових насаджень. Визначено, що найбільший вплив зазнали Африка та Південна Америка з найбільшою кількістю сповіщень (54283) й високим вмістом у повітрі чадного газу (230,5–404,1 ppm) і діоксиду сірки (4,2–2,9 мг/м³). Пошкоджено 123069410,1 га червоних фералітних, червоно-жовтих, коричневих і сіро-коричневих ґрунтів, 2555209,7 га постраждалих екваторіальних, тропічних і субтропічних лісів.

Особливу увагу приділено інноваційним методам боротьби з лісовими пожежами, які базуються на технологіях ШІ. Вони дозволяють здійснювати моніторинг територій, прогнозувати ризик виникнення пожеж, оптимізувати розподіл ресурсів і сприяти відновленню екосистем. Наприклад, система Alert California AI успішно використовує дані з камер і супутників для виявлення пожеж на ранніх стадіях.

Результати досліджень можуть бути використані для розробки регіональних планів протидії лісовим пожежам, удосконалення законодавчої бази, впровадження освітніх програм, створення інтегрованої системи управління з використанням ШІ, що сприятиме підвищенню ефективності природоохоронних заходів і адаптації до кліматичних змін. *Ключові слова:* лісові пожежі, континенти, геоінформаційні системи, моніторинг, забруднення повітря, кліматичні зміни, штучний інтелект, прогнозування, ефективне управління.

Experience of monitoring forest fires on continents by GIS means. Saranenko I.

The article analyzes the dynamics of the spread of forest fires on the continents and their consequences for the environment, highlights the prospects of using tools of geographic information systems (GIS) and technologies of artificial intelligence (AI) to forecast and prevent their occurrence.

The work considers global and regional aspects of the problem, in particular the dependence of the scale of fires on climatic and environmental factors. Based on data from NASA fire map, Global Forest Watch and ArcGIS Living Atlas and other sources, monitoring of forest fires in North and South America, Eurasia, Australia and Africa was carried out.

In the period from June to August 2024, forest fires, climatic conditions and atmospheric pollution were registered according to the following indicators: the number of notifications; area, ha; burnt green plantations, ha; average wind speed; temperature, °C; air humidity, %; precipitation, mm; CO, ppm; SO₂, mg/m³; mass of dust, mg/m³. More than 61,000 were recorded. forest fires that destroyed 154 million ha of land and 23 mln. ha of forest plantations. It was determined that Africa and South America were the most affected, with the largest number of notifications (54,283) and high levels of carbon monoxide (230.5–404.1 ppm) and sulfur dioxide (4.2–2.9 mg/m³) in the air. 123069410.1 hectares of red feralitic, red-yellow, brown and gray-brown soils were damaged, 2555209.7 hectares of equatorial, tropical and subtropical forests were damaged.

Special attention is paid to innovative methods of fighting forest fires, which are based on AI technologies. They allow you to monitor areas, predict the risk of fires, optimize the allocation of resources and promote the restoration of ecosystems. For example, the Alert California AI system successfully uses data from cameras and satellites to detect fires in the early stages.

Research results can be used to develop regional plans to combat forest fires, improve the legislative framework, implement educational programs, create an integrated management system using AI, which will contribute to increasing the effectiveness of environmental protection measures and adaptation to climate change. *Key words:* forest fires, continents, geoinformation systems, monitoring, air pollution, climate change, artificial intelligence, forecasting, effective management.

Постановка проблеми. Лісові пожежі є природним явищем, яке відіграє значну роль у функціонуванні екосистем, але їхня інтенсивність і частота значно зросли через антропогенні чинники та кліматичні зміни. Виникають серйозні екологічні, економічні та соціальні загрози, такі як втрата біоріз-

номаніття, деградація ґрунтів, забруднення повітря та глобальне потепління. Геоінформаційні системи (ГІС) забезпечують нові можливості для просторового аналізу, прогнозування та управління лісовими пожежами, тому що традиційні методи моніторингу пожеж обмежені в масштабності та оперативності.

Головною метою статті є аналіз динаміки розповсюдження лісових пожеж на континентах, їх впливу на якість повітря та огляд сучасних методів попередження і вивчення. Для досягнення поставленої мети виконані наступні завдання:

- аналіз даних з NASA fire map та додаткових джерел інформації щодо визначення динаміки та причин виникнення лісових пожеж;
- аналіз показників щоденного моніторингу;
- огляд сучасних методів на основі штучного інтелекту, які вже зараз допомагають людству відстежувати та боротися з пожежами.

Актуальність дослідження. У зв'язку із зростанням площ, охоплених пожежами та їх катастрофічними наслідками, дослідження механізмів виникнення і поширення пожеж та методів їхнього попередження є важливим для стійкості екосистем. Величезне значення має врахування регіональних особливостей кожного континенту, що впливає на характер пожеж і стратегії боротьби з ними.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Стаття спрямована на систематизацію знань про лісові пожежі як глобальну проблему, аналіз їхніх наслідків для різних континентів та пошук інноваційних підходів до їх запобігання. Дослідження сприяє підвищенню ефективності природоохоронних заходів і адаптації до змін клімату.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Будь-яка неконтрольована лісова пожежа є екологічним лихом та завдає шкоди всім сферам. Найчастіше вони виникають внаслідок діяльності людини через порушення пожежної безпеки, правил користування вогнем і вибухонебезпечними предметами [2]. Важливим показником є глобальне потепління. За даними Міжурядової групи експертів зі змін клімату (МГЕЗК) температура на планеті підвищилася на 1,5 °C порівняно з доіндустріальним періодом суспільства. За розрахунковими оцінками, діяльність людини є причиною глобального потепління приблизно вище на 1,0 °C з діапазоном від 0,8 °C до 1,2 °C. У період між 2030–2052 роками глобальне потепління може досягти 1,5 °C [3].

Згідно з даними NASA, лідером за виникненням пожеж у світі є регіони екваторіальної Африки. Також вогнем охоплені Північна і Південна Америка, Євразія, Африка, Австралія, Мадагаскар та острови Індонезії, а також Південна Америка з обох боків екватору [4, 5].

Перебіг лісових пожеж особливо ускладнений в країнах з великими просторами та малою щільністю населення (Австралія, Канада, США). Часто розвинені країни не в змозі їх вчасно зупинити, що завдає шкоди великій кількості гектарів лісових насаджень, нерідко перекидаються на населені пункти.

З використанням супутників стало відомо, що лише у бореальних лісах планети у 80-х роках минулого століття щорічно горіло близько 8 млн га

[5]. У 90-ті роки порівняно з 80-ми кількість лісових пожеж в Західній Європі зростає практично на 40%. У США та Канаді щорічно реєструють понад 150 тис. лісових пожеж [6]. Серед європейських країн за періоди 2000–2007 рр. та 2010–2019 рр. найбільше пожеж зафіксовано в Португалії та Іспанії (210–156 тис. і 19362 тис. – 11860 тис. випадків відповідно). Не менш напружена ситуація у Польщі, Франції, Італії, Швейцарії, де зареєстровано від 7188 до 3865 тис. випадків пожеж із загальною площею від 63 тис. га до 12 тис. га [6].

Для боротьби з пожежами використовуються системи моніторингу, наприклад, супутникові дані, проте ефективність таких заходів залежить від міжнародного співробітництва та місцевих ресурсів.

Спільний підхід до оцінювання пожежних ризиків для усіх країн Європи почав формуватися на початку двадцятих років XXI століття (San-Miguel-Ayanz et al. 2017, 2018) та визначив ризик пожежі як поєднання небезпеки й вразливості ділянок об'єктів історико-культурної спадщини, ідентифікованих цінностей для збереження, економічних чи соціальних ресурсів, що можуть бути локалізовані на території. Перед початком такої розбудови відбувалося широке обговорення національних підходів до оцінювання пожежних ризиків (проведено 36–43 зустрічі експертів з лісових пожеж впродовж 2017–2022 років). Авторами розробки є науковці JRC та EFFIS (Jacome Felix Oom D., Pfeiffer H., Branco A., Ferrari D., Grecchi R., Artes Vivancos T., Durrant T., Boca R., Maianti P., Liberta G. And San-Miguel-Ayanz J.) [1].

Сучасні дослідження висвітлюють зв'язок лісових пожеж із глобальним потеплінням (IPCC, 2021), вплив пожеж на вуглецевий баланс (Christopher Williams, Huan Gu, 2024), а також інноваційні методи прогнозування і контролю (Smith & Zhang, 2022).

Серед українських вчених стан охорони лісів від пожеж досліджував Зибцев С.В. (2000), динаміку ландшафтних пожеж та еколого-економічні наслідки їх виникнення вивчав Буц Ю.В. (2013), вплив лісових пожеж на стан водних екосистем визначали Рибалова О.В., Коробкіна К.М. (2018). Серед закордонних вчених відомі: Nagajvoti P.C., Lee K.D. and Sreekanth T.V.M. (2010), Niassy S. And Diarra K. (2012), Chris Dickman (2020).

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значний прогрес у вивченні лісових пожеж, залишаються невирішеними питання щодо інтеграції регіональних даних у глобальні моделі, вдосконалення систем раннього сповіщення та економічної оцінки наслідків лісових пожеж для біорізноманіття та місцевих громад.

Новизна. У даній роботі проведений порівняльний аналіз впливу лісових пожеж на різних континентах та запропонований універсальний підхід до управління пожежами з урахуванням місцевих екологічних і соціальних умов.

Методологічне або загальнонаукове значення. Результати дослідження можуть бути використані для створення моделей, що враховують регіональні особливості та розробки стратегій адаптації екосистем до кліматичних змін. Це сприяє гармонізації міжнародної співпраці в галузі природоохоронної діяльності.

Викладення основного матеріалу. У період з червня по серпень 2024 року проведені щоденні спостереження за наступними показниками: кількість сповіщень про лісові пожежі; площа, га; швидкість вітру, м/с; вологість повітря,%; температура, °C; опади, мм; вміст CO, ppm; SO₂, мг/м³ (табл. 1). Визначені основні пошкоджені типи ґрунтів та видовий склад лісових насаджень (табл. 2).

Для визначення динаміки виникнення лісових пожеж застосовані такі ресурси як NASA fire map, Global Forest Watch та ArcGIS Living Atlas; проаналізовано Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa; кліматичні показники визначали на Windy.com; забруднення повітря на Waqi.info [4–7, 15]. Обробку результатів виконано у Microsoft Excel.

У результаті проведеного аналізу виявлено, що у період спостереження інтенсивність лісових пожеж висока. Вони супроводжуються значними викидами чадного газу та діоксиду сірки при високій температурі повітря. Вигорають величезні площі лісів та ґрунтів. Найбільша кількість сповіщень за період спостережень пролунала в Африці (329150,0) та Південній Америці (21368,0) з охопленням площі, га:

Таблиця 1

Показники моніторингу лісових пожеж на континентах

Показники моніторингу	Північна Америка	Південна Америка	Євразія	Австралія	Африка
Сумарні показники					
Кількість сповіщень	454,0	21 368,0	1710,0	4908,0	32 915,0
Площа, га	2084 028,3	85926 553,7	16353 280,1	12971 483,3	37142 856,4
Вигоріло зелених насаджень, га	8 847,1	2546 077,7	4830 495,6	6725 529,7	9132 549,3
Опади, мм	220,8	276,0	970,0	102,9	220,8
Середні показники					
Швидкість вітру, м/с	8,0	6,0	7,0	8,0	7,0
Вологість повітря, %	60,0	64,4	49,1	56,0	46,6
Температура, °C	+29,0	+25,0	+31,0	+24,0	+27,3
Вміст CO, ppm	169,3	404,1	169,6	93,1	230,5
Вміст SO ₂ , mg/m ³	3,4	2,9	3,4	0,7	4,2
Маса пилу, мг/м ³	4,0	4,0	58,6	0,5	0,5

Таблиця 2

Пошкоджені ґрунти та лісові насадження

Континент	Основні типи пошкоджених ґрунтів	Види рослин та лісових насаджень, що вигоріли
Північна Америка	жовтоземи, червоноземи, бурі лісові, червоно-жовті, каштанові, чорноземи	рослини зони вологих лісів: білий дуб, магнолія, болотний кипарис, чорний горіх, рододендрон; вічнозелених лісів: ялиця, юка, лимонне дерево
Південна Америка	червоні фералітні, червоно-жовті, коричневі і сіро коричневі	рослини екваторіальних лісів: пальми, гевеї, деревоподібні папороти, рослини субекваторіального поясу: злакові культури пшениці, кукурудзи та рослини тропічного поясу, чагарникові рослини та злаки
Євразія	червоні фералітні, коричневі і сіро коричневі, чорноземи степів і лісостепів, бурі лісові, сірі лісові.	лісові насадження ялини, дубу, ялиці, липи, модрина, зони мішаних та субтропічних лісів
Австралія	червоні фералітні ґрунти вологих лісів і високотравних саван, червоно-бурі саван, пустельні	лісові насадження акації австралійської, евкالیптів, деревоподібні папороти, кокосові пальми, банани, мангри
Африка	червоно-жовті фералітні вічнозелених лісів, червоні фералітні – ґрунти вологих лісів і саван, коричнево-червоні фералітні твердолистяних лісів, червоно-бурі ґрунти	види рослин та лісових насаджень акації зонтичної, мангрові зарості, олійні пальми, бананові дерева

37142 856,4 та 85926 553,7; вигорілих лісових насаджень, га: 9132 549,3 та 2546 077,7. Вміст чадного газу перевищував нормативні значення в десятки разів, ppm: 230,5 та 404,1. Близько 62% викидів CO₂ від лісових пожеж припадає на савану В Африці зафіксований високий вміст вміст SO₂, mg/m³ – 4,19; в Євразії концентрація пилу сягала – 58,6 мг/м³.

Потрібно зазначити, що лісові пожежі на сьогодні є джерелами CO та парникових газів, які постійно поповнюються.

Серед типів пошкоджених ґрунтів переважають червоні фералітні, червоно-жовті, коричневі і сіро-коричневі; серед вигорілих рослин – екваторіальні ліси: пальми, геветі, деревоподібні папороті; субекваторіальні: культури пшениці, кукурудзи та рослини тропічного поясу.

Визначено, що лісові пожежі різняться за масштабами і причинами в залежності від континенту. У Північній Америці значний вплив антропогенних чинників та часте виникнення пожеж у лісах помірного поясу. У Південній Америці лісові пожежі часто виникають у басейні Амазонки через вирубку лісів. В Австралії природний характер пожеж пов'язаний з особливостями клімату та рослинності. В Африці найбільший відсоток територій, охоплених пожежами, внаслідок наявності саванних екосистем. У Європі збільшення кількості пожеж у південних регіонах пов'язано зі зміною клімату. В Азії пожежі виникають внаслідок аграрної діяльності та неконтрольованих підпалів.

Штучний інтелект (ШІ) є відносно новою технологією широкого застосування цифрових технологій, зокрема, алгоритмів обробки великих масивів даних для удосконалення процесів забезпечення різних аспектів життєдіяльності суспільства. Тому застосування цієї технології досі не стандартизовано, немає чіткого визначення терміну «штучний інтелект», триває вивчення можливостей його застосування у різних сферах [8].

Специфікою надання послуг ШІ для аналізу причин та наслідків лісових пожеж є обробка великої кількості інформації й прогнозування погодних умов, температури та можливість вистежування вогнища і процеси після пожеж, що відкриває широкий спектр можливостей у аналізі причин виникнення та їх екологічних наслідків (рис. 1).

1. Моніторинг території. Системи штучного інтелекту аналізують дані з супутників, дронів або датчиків, щоб виявити можливі пожежі на ранніх стадіях [8, 9]. Як приклад, каліфорнійські вогнеборці розмістили на території лісів спеціальні камери, що слідкують і фіксують пожежі та одразу передають сигнал до відповідних служб. Програма має назву Alert California AI, яка була створена в партнерстві з Каліфорнійським університетом у Сан-Дієго. Система отримує дані з 1032 камер, які обертаються на 360 градусів [10].

2. Прогнозування ризику пожеж. Штучний інтелект використовує для аналізу кліматичні дані, рельєф місцевості, історію пожеж, супутникові знімки, тип рослинності та інших чинників для прогнозування ризику виникнення пожеж у певних районах. Отримані дані піддаються попередній обробці, а потім штучний інтелект використовує алгоритми машинного навчання для аналізу даних та вибору ознак, які найбільше впливають на ризик пожеж. Це може охоплювати виявлення кореляцій між різними параметрами. Після чого на отриманих даних будується модель прогнозування ризику пожежі. Це може бути класифікаційна модель, яка прогнозує ймовірність виникнення пожежі у певному районі або регресійна, що моделює потенційний розмір та поширення пожежі. Отриману модель потрібно протестувати, щоб оцінити її точність. У разі відповідності вимогам, вона може бути застосована для прогнозування ризику пожеж на нових даних [11].



Рис. 1. Схема ефективного управління лісовими пожежами

У світі вже існує досвід використання технологій штучного інтелекту для попередження та ліквідації пожеж.

1. Прогностичні моделі поведінки пожежі. Деякі наукові групи та компанії розробляють прогностичні моделі, які використовують штучний інтелект для прогнозування поведінки лісових пожеж у різних умовах. Наприклад, компанія Simtable використовує ігрові технології та штучний інтелект для моделювання розвитку пожеж та розробки стратегій ліквідації.

2. Системи моніторингу та раннього виявлення пожеж. Кілька компаній та наукових установ розробляють системи, які використовують штучний інтелект для аналізу даних з супутників, дронів та інших джерел. Наприклад, NASA спільно з іншими організаціями розробляє систему FUEGO (Fire Urgency Estimator in Geosynchronous Orbit) [12], яка використовує дані з супутників для виявлення лісових пожеж у реальному часі.

3. Системи керування пожежними ресурсами. Деякі рятувальні служби використовують системи штучного інтелекту для оптимізації розподілу ресурсів під час боротьби з лісовими пожежами. Наприклад, у місті Мельбурн (Австралія) введена система комп'ютерного моделювання, яка допомагає вогнеборцям приймати рішення щодо того, як краще розміщувати свої сили та ресурси [13, 14].

Головні висновки. За допомогою сучасних засобів ГІС проведений моніторинг виникнення лісових пожеж на континентах світу та визначені деякі показники щодо пожеж, клімату, забруднення повітря. Встановлено, що за період з червня по серпень 2024 року сумарно: кількість сповіщень склала – 61355; пожежами знищено площі землі – 154478202,0 га, зелених насаджень – 23243499,4 га. Найбільше шкоди лісові пожежі завдали Африці та Південній Америці, де спостерігався високий вміст чадного газу (230,5 та 404,1 ppm) і двоокису сірки (4,2 та 2,9 mg/m³), велике значення маси пилу спостерігалось в Євразії – 58,6 мг/м³, у тому числі внаслідок лісових пожеж.

Лісові пожежі є глобальною проблемою, яка вимагає комплексного підходу. Необхідно зосередити увагу на запобіганні виникненню небезпечних явищ, їх ефективному управлінню та вдосконаленню систем моніторингу, розробити світову ефективну систему управління пожежами з використанням технологій ШІ, яка б аналізувала поточну ситуацію, прогнозувала можливі наслідки, допомагала в ліквідації, супроводжувала відновлення екосистеми.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати можуть бути використані для розробки регіональних планів протидії лісовим пожежам, зокрема вдосконалення законодавчої бази та впровадження освітніх програм з екологічної безпеки.

Література

1. Kira M. Hoffman Conservation of Earth's biodiversity is embedded in Indigenous fire stewardship: Research article 2021 P. 45. URL: <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2105073118> (дата звернення: 09.09.2024).
2. Лісові пожежі як екологічна проблема. *Karbon*: веб-сайт. URL: <https://karbon-cns.com.ua/uk/liisovii-pozhezhi-yak-ekologichniya-problema.html> (дата звернення: 03.09.2024).
2. Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*: веб-сайт. URL: <https://www.ipcc.ch/> (дата звернення: 03.09.2024).
3. NASA fire map URL: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:2024-05-15;@47.4,0.0,2.7z> (дата звернення: 04.09.2024).
4. 5. Waqi.info. URL: <https://waqi.info/#/c/3.764/8.243/2z> (дата звернення: 05.09.2024).
5. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022. *JRC Publications Repository*: веб-сайт. URL: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC135226> (дата звернення: 07.09.2024).
6. ArcGIS Living Atlas. URL: <https://livingatlas.arcgis.com/en/home/> (дата звернення: 07.09.2024).
7. Штучний інтелект: *Дія. Освіта*. веб-сайт. URL: <https://osvita.dia.gov.ua/courses/artificial-intelligence> (дата звернення: 09.09.2024).
8. 9. Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування/ А.В. Орещенко, В.І. Осадчий, М.В. Савенець, В.О. Балабух: Вісник НАН України. 2020. № 11. С. 33-44. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/173800> (дата звернення: 09.09.2024).
9. У Каліфорнії почали застосовувати ШІ для виявлення потенційних пожеж. *UAINFO*: веб-сайт. URL: <https://ksu24.kspu.edu/s/JiX6p> (дата звернення: 10.05.2024).
10. Моніторинг і оцінка: базові поняття. *Основи здоров'язбережної компетентності. Курс підготовки вчителів*: веб-сайт. URL: <http://multycourse.com.ua/ua/page/21/45> (дата звернення: 10.10.2024).
11. FUEGO Fire Urgency Estimator in Geostationary Orbit. URL: <https://fuego.ssl.berkeley.edu/> (дата звернення: 11.05.2024).
12. Вчені розповіли як штучний інтелект допоможе уникнути екологічної катастрофи. *Noworries*: веб-сайт. URL: <https://ksu24.kspu.edu/s/xAAAH> (дата звернення: 13.10.2024).
13. Масштабні лісові пожежі у світі: статистика та причини загоряння. *UNN*: веб-сайт URL: <https://ksu24.kspu.edu/s/oCWRw> (дата звернення: 14.10.2024).
14. Global forest watch/ URL: <https://ksu24.kspu.edu/s/txiVA> (дата звернення: 15.10.2024).