Ukrainian Journal of Remote Sensing
journal homepage: www.ujrs.org.ua

https://doi.org/10.36023/ujrs.2026.13.3.311

УДК 629.735.45.05-519:614.842.4:553.97:528.88

Особливості та умови застосування безпілотних технологій для виявлення прихованих осередків загоряння торф'яних ґрунтів

М. О. Попов[1]*, https://orcid.org/0000-0003-1738-8227
Р. В. Пономаренко[2], https://orcid.org/0000-0001-8445-8251
С. П. Мосов[2], https://orcid.org/0000-0003-0833-3187

[1] *ДУ Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна*
[2] *Інститут наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України, вул. Вишгородська, 21, Київ, 04074, Україна*

У статті визначено особливості та умови застосування сучасних безпілотних технологій для розв'язання актуального завдання з виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів. Запропоновано модель процесу виявлення теплової аномалії як ознаки прихованого осередку загоряння. До особливостей та умов застосування безпілотних технологій віднесено: безпілотний літальний апарат (БпЛА), його тактико-технічні характеристики та корисне навантаження, метеорологічні умови, орнітологічна обстановка, пора року, час доби, кваліфікаційний рівень зовнішнього пілота, повітряна обстановка та програмно-технічний комплекс тематичного оброблення даних моніторингу. Показано, що метеорологічні умови можуть створювати перешкоди різноманітного характеру в процесі льотної експлуатації безпілотника. Його чутливість до швидкості та поривів вітру може призвести до втрати зовнішнім пілотом управління польотом БпЛА. Акцентовано увагу на тому, що пора року та час доби впливають на якість пілотування, а також пов'язані з таким негативним явищем, як турбулентність атмосфери. Тактико-технічні характеристики БпЛА обмежують можливості його льотної експлуатації та виконання завдань обстеження в різні пори року та в різноманітних метеорологічних умовах. Ця важливість врахування орнітологічної обстановки, ускладнення якої може створювати перешкоди для безпеки польоту БпЛА в районі обстеження. Важливим елементом оперативного оцінювання зовнішнім пілотом є повітряна обстановка, яку треба враховувати під час виконання обстеження стану торфовищ в несегрегованому повітряному просторі. Доведено, що корисне навантаження безпілотника є надважливою складовою системи обстеження в інтересах виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів. Акцентовано увагу на доцільності створення бази сигнатур від видової та параметричної апаратури корисного навантаження в наземному комплексі оброблення за результатами попередніх польотів на обстеження стану торфовищ. Наведено висновки та висвітлено перспективи подальших досліджень за напрямом виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів в інтересах своєчасного реагування на них рятувальною службою.

Ключові слова: торф, пожежа, теплова аномалія, аерознімання, безпілотний літальний апарат, тепловізор.

© М. О. Попов, Р. В. Пономаренко, С. П. Мосов. 2026

Вступ

Торфові родовища – потужний природний актив, який традиційно використовується в промисловості, сільському господарстві, водокористуванні тощо [Блажно та ін., 2012]. Унікальною є властивість торфовищ накопичувати величезні обсяги вуглецю у вигляді парникових газів (CO_2, CH_4 та ін.), що дуже затребуване в контексті цілей Паризької кліматичної угоди (UNFCCC), ухваленої 12 грудня 2015 року Організацією Об'єднаних Націй. Хоча торфовища покривають лише 3…4% суші світу, вони зберігають близько третини загальносвітових запасів вуглецю ґрунту (Scharlemann et al., 2014).

Однак, незважаючи на важливу роль торфових родовищ у наданні різноманітних екосистемних послуг, вони одночасно є джерелами значних небезпек та загроз, насамперед пожеж. Викиди різних газів та дрібнодисперсних частинок, що генеруються торфовищами в процесі горіння, серйозно забруднюють повітря, завдаючи шкоди здоров'ю людини. Пожежі на торфовищах можуть вивільнювати в атмосферу значно більше накопичених ними парникових газів, ніж будь-який інший тип пожежі. Пожежі часто охоплюють величезні площі, змінюючи ландшафт і властивості земної поверхні, зокрема альбедо. Деякі з наслідків таких пожеж мають довгостроковий характер, а в

*Corresponding author / Автор для кореспонденції: M. O. Popov / М. О. Попов / e-mail: mpopov@casre.kiev.ua

This is an Open Access article under the CC BY licenses (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)
Стаття опублікована на умовах відкритого доступу за ліцензією CC BY (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

підсумку все це посилює парниковий ефект і прискорює глобальне потепління.

За складністю виявлення та прогнозування розвитку подій торф'яним пожежам серед ландшафтних пожеж, чи то пожеж природного або штучного походження, належить особливе місце (Попов та ін., 2026). Якщо більшість відомих типів пожеж характеризуються полум'яним горінням, то горіння торфу зазвичай відбувається в режимі тління, тобто в безполум'яній фазі. За певних умов – достатньої кількості кисню, помірного вітру, наявності шляхів поширення вогню – безполум'яне горіння поступово переходить в полум'яне, тобто виникає торф'яна пожежа.

Спостерігати, а тим паче контролювати і прогнозувати розвиток цього процесу дуже важко, бо тління торфу є підповерхневим (прихованим) процесом горіння, ініційованим внутрішнім розігрівом матеріалу як за рахунок кисню, що надходить зовні разом з повітрям, так і за рахунок його виділення при термічному розкладанні згораючої речовини.

Однак, на сьогодні існують методи, за допомогою яких будуються прогнозні оцінки щодо ймовірності виникнення торф'яної пожежі на заданій території, зокрема з визначенням геолокації ділянок найбільшої небезпеки. Такі оцінки базуються на аналізі фізико-географічних та кліматичних особливостей досліджуваного району, фізичних характеристик місцевого торфу, домінуючих напрямків людської діяльності в межах означеної агломерації, ретроспективної (історичної) інформації та ін.

Необхідна інформація отримується з різноманітних геопросторових баз даних, репозиторіїв, спектральних бібліотек, наукових звітів, публікацій тощо. Для збору актуальних даних щодо стану ґрунтів, атмосфери, рослинності, гідрології, змін в інфраструктурі проводяться відповідні польові дослідження, замовляються матеріали аеро- та супутникового знімання. Також корисними є різноманітні геоінформаційні продукти, що отримуються за матеріалами супутникового знімання, наприклад, нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI), індекси сухості (DI), вологості, просторовий індекс пожежної небезпеки торфовищ (SPFDI), індекс вразливості до торф'яних пожеж (PFVI) тощо.

В останні два десятиліття все частіше для виявлення торф'яних пожеж, прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торфовищ, а також для прогнозування їхнього виникнення, використовуються методи і технології, що базуються на залученні безпілотної авіації (Мосов та ін., 2020; Czapiewski et al., 2022). Завдяки таким перевагам безпілотної авіації, як оперативність виконання польотних завдань, можливість швидкого реагування при змінах ситуації, висока економічність, вона вважається альтернативним рішенням методам, що базуються на використанні супутникового знімання (Мосов, 2019). Безпілотні літальні апарати (БпЛА) можна використовувати для оперативного обстеження територій з повітря, даючи змогу зовнішньому пілоту (зовнішньому пілоту-оператору) залишатися на безпечній відстані від небезпечного об'єкта.

Відзначимо, що одним із перших в Україні прикладів застосування безпілотної технології для виявлення торф'яних пожеж стало проведення влітку 2016 року обстеження торфовища поблизу села Данівка Козелецького району Чернігівської області (Аеророзвідка, 2016). У дослідженні брали участь науковці Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України» і співробітники Українського науково-дослідного інституту цивільного захисту Державної служби України з надзвичайних ситуацій. Дистанційне обстеження торфовища здійснювалось за допомогою БпЛА, обладнаного тепловізором та відеокамерою (безпілотник і знімальна апаратура були надані компанією DroneUA).

Результати дослідження свідчать про реальні можливості дистанційно, за допомогою БпЛА, обладнаного необхідною знімальною апаратурою, визначати масштаби торф'яної пожежі та виявляти місця прихованого горіння торфу.

У цій роботі наведено огляд досліджень і публікацій, в яких розглянуто новітні дистанційні методи виявлення торф'яних пожеж за допомогою БпЛА, приклади їх практичного застосування в різних регіонах світу, відзначено проблеми, які при цьому виникають і потребують розв'язання. Значну увагу приділено аналізу особливостей та умов застосування безпілотних технологій у задачах виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів.

Аналіз публікацій

Загоряння і пожежі, що виникають у торф'яних ґрунтах, супроводжуються аномальним виділенням тепла, а також цілої низки різних газів (CO, CO_2, CH_4, SO_2, NO_2 та ін.). Зміни кольору та структури ґрунту, обумовлені небезпечною зміною теплової аномалії торфовищ, також можуть бути джерелом інформації про їхній стан. Це визначає потребу в різноманітності корисного навантаження БпЛА. Численні питання, пов'язані з розробленням та удосконаленням методів виявлення небезпечних теплових аномалій торфовищ і торф'яних загорянь дистанційними методами, висвітлюються в працях вітчизняних та закордонних фахівців.

У роботі (Ліщенко та ін., 2022) проаналізовано відомі підходи до розрахунків температури і вологості поверхні торфовищ, обговорюються критерії оцінювання рівня ризику виникнення пожеж на торфовищах і визначено критичні значення цих показників для загоряння торфу. Пропонується методико-технологічна схема використання супутникових даних для визначення ризиків виникнення пожеж на торфовищах.

Проблемам раннього попередження про пожежі на торфовищах та оцінювання небезпеки підземних пожеж за даними температурного поля присвячено дослідження (Artiushenko et al., 2020). На основі

статистичного мультифрактального аналізу супутникових зображень доведено, що структура просторового розподілу теплового поля по поверхні торфовищ дає змогу виявляти теплові аномалії і небезпечну пожежну ситуацію в цілому, а також контролювати пожежу на всіх стадіях її розвитку.

У праці (Sam-Odusina et al., 2025) для виявлення пожежі на торфовищах запропоновано використовувати тепловізори (робочий діапазон довжин хвиль 8…14 мкм), оскільки вони дають змогу БпЛА відносно швидко обстежити великі (літакового типу) або локальні (мультироторного типу) площі та виявити теплове випромінювання від небезпечних теплових аномалій торфовищ або торф'яних загорянь під і над поверхнею ґрунту. Разом з тим, автори акцентують увагу на обмежених можливостях RGB-камери для отримання даних, оскільки якість цих даних може значно варіюватися залежно від умов навколишнього середовища, таких як опади, туман, а також час доби. Ще одним обмеженням є те, що RGB-камери не здатні виявляти пожежі в димці. Отже, їх застосування для виявлення торф'яних загорянь (негативних теплових аномалій) обмежене.

Аналогічний підхід з використанням тепловізора та RGB-камери, встановлених на борту БпЛА мультироторного типу, для комплексного виявлення підземних тліючих торф'яних пожеж, запропоновано у (Burke et al., 2019).

У (Meimetis et al., 2024) представлена автономна та масштабована система моніторингу для раннього виявлення та оцінювання поширення лісових (торф'яних) пожеж, що використовує недорогі БпЛА, супутникові дані і наземні датчики. Набір наземних датчиків, таких як стаціонарні вишки, оснащені тепловізорами і датчиками IoT, розміщених у районах з високою ймовірністю лісових і торф'яних пожеж, працюватиме в тандемі з космічними та повітряними системами для генерації точного та всеосяжного потоку інформації. Цей комплексний підхід спрямований на використання ключових переваг усіх систем, забезпечуючи при цьому їхню безперебійну взаємодію. З огляду на масштабованість та ефективність, система розроблена для роботи з недорогими БпЛА, що серійно випускаються та мають як корисне навантаження тепловізори та RGB-камери, які будуть виступати основним генератором ситуаційної обізнаності на запит.

Варіант використання БпЛА для проведення моніторингу та виявлення підземних теплових аномалій наведений у (Elbasit et al., 2024). До складу корисного навантаження БпЛА увійшли два типи апаратури, які були встановлені на гексакоптері для збору багатоспектральних (4 канали) і тепловізійних даних. Тепловізійні дані отримувались у ранній період часу, щоб видалити фон сонячного тепла та виявити будь-які підземні теплові аномалії. Вони були відкалібровані за даними про температуру наземної контрольної точки. Тепловізійні зображення були перераховані до розміру піксела в 0,08 м. Багатоспектральні дані отримувалися в середині дня. Вони були складені в мозаїку, орторектифіковані, опісля повторно дискретизовані до піксела в 0,05 м. Також отримувалися дані про стан ґрунту: вологість, виміряна діелектричним датчиком, і теплові характеристики, виміряні за допомогою аналізатора теплових властивостей KD2 Pro. Далі розраховувалися різні індекси, такі як просте відношення (SR), нормалізований різницевий вегетаційний індекс (NDVI), а також індекс «червоного краю» рослинності. Також розраховувався комбінований індекс для визначення поверхневої вологості (затоплення) як основного показника схильності до торф'яних пожеж.

У дослідженні (Langhammer et al., 2024) запропоновано методологічний підхід до моніторингу змін стану торфовищ в умовах перехідного клімату за багатоспектральними і тепловими зображеннями, отриманими за допомогою БпЛА, в інтересах оцінювання просторової та часової динаміки змін у торфовищі з високим ступенем деталізації. Дані високої просторової розрізненості виявили різні траєкторії змін спектральних індексів рослинності та температурної реакції в гірських торфовищах. Багатоспектральне знімання свідчить про послідовність змін площі водно-болотних угідь у відповідь на потепління та посуху. Високорозрізнене теплове картографування за допомогою БпЛА свідчить про диференціальні температури поверхні ґрунту в різних категоріях рослинності та зонах торфовищ. Для гірських торфовищ, розташованих у важкодоступних районах і часто з обмеженим доступом, що актуально і для України, моніторинг за допомогою БпЛА, багатоспектрального знімання та тепловізорів згідно з результатами, наведеними у (Langhammer et al., 2024), виявився надійним інструментом для визначення та моделювання мінливих умов навколишнього середовища.

На доцільності застосування БпЛА з комплексуванням багатоспектральної камери, тепловізора, лідара, радара і RGB-камери акцентується увага у (Li, Y., et al., 2024) у ході моніторингу та картографування рельєфу й рослинності в поєднанні з детальною характеристикою підповерхневих властивостей торф'яного ґрунту.

Для розв'язання складних завдань оброблення та аналізу інформації, що формується бортовими сенсорами різної фізичної природи сьогодні все більш широко використовуються можливості штучного інтелекту (ШІ). У (Pedram et al., 2024) стверджується, що БпЛА з підтримкою ШІ будуть надавати дані з високою розрізнювальною здатністю в режимі реального часу, які можуть мати вирішальне значення для виявлення ризиків виникнення пожеж, зокрема торф'яних, і підвищення ефективності планування та стратегій запобігання пожежам.

Більш того, порівняно з традиційними системами раннього оповіщення, які покладаються насамперед на статичні сенсорні мережі та людські спостереження, динамічна природа БпЛА з підтримкою ШІ дасть змогу застосовувати адаптивні стратегії моніторингу. Це означає, що сектори торф'яних ґрунтів, що становлять інтерес, можуть контролюватися частіше та з більшою деталізацією,

що, своєю чергою, призведе до більш раннього виявлення потенційних торф'яних загорянь (небезпечних теплових аномалій). Інтеграція ШІ, за ствердженням авторів (Pedram et al., 2024), здатна додатково розширити ці можливості, даючи змогу аналізувати великі набори даних для прогнозування та точного визначення ймовірних місць загоряння на основі попередньо зібраних даних і даних в режимі реального часу. Схожий підхід висвітлений у (Ramadan et al., 2024).

У сукупності, наявні публікації дають змогу знайти адекватні відповіді на багато питань, пов'язаних із розробленням і застосуванням дистанційних методів і безпілотних технологій у завданнях обстеження поточного стану торфовищ. Разом з тим, за межами опублікованих досліджень залишилося відкритим питання визначення особливостей та умов застосування БпЛА для виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів. Важливість цього питання обумовлена тим, що практика застосування безпілотної авіації для обстеження торфовищ свідчить, що ефективність дистанційного виявлення теплових аномалій як ознак торф'яних загорянь визначається не тільки рівнем досконалості бортового комплексу БпЛА, але залежить також від низки зовнішніх чинників, таких як характер місцевості, метеорологічні умови, пора року і час доби, повітряна і орнітологічна обстановка в районі тощо. Тому предметом подальшого розгляду є дослідження особливостей впливу означених чинників на ефективність застосування безпілотної технології для обстеження торфовищ.

Модель процесу виявлення теплової аномалії як ознаки прихованого осередку загоряння

Як свідчить проведений вище аналіз сучасних методів і технологій дистанційного обстеження торфовищ, головною ознакою прихованого осередку загоряння є наявність теплової (температурної) аномалії на відповідній ділянці земної поверхні.

Модель процесу виявлення теплової (температурної) аномалії як ознаки прихованого осередку загоряння наведена на Рис. 1, де позначено $t_{ос}$ – температура в осередку загоряння; $t_{пов}$ – температура на відповідній ділянці земної поверхні; $t_{фо}$ – фонова температура земної поверхні; $t_{бс}$ – дистанційний вимір температури ділянки земної поверхні за допомогою бортової апаратури; φ – математичний оператор; $T_{пор}$ – порогова температура самозаймання.

Температура на відповідній ділянці земної поверхні, яку безпосередньо генерує осередок загоряння, визначається як

$$t_{пов} = t_{ос} - \Delta t, \qquad (1)$$

де Δt – втрата температури при проходженні потоку теплової енергії крізь торф'яний шар.

З моделювання послаблення теплової енергії (температури) осередку загоряння при її виході на земну поверхню може бути враховано за допомогою певного математичного оператора φ. Рівень послаблення залежить від глибини залягання осередку, типу торф'яного середовища, вологості торфу тощо. Оператор φ розраховується на основі експериментальних даних за допомогою регресійного підходу.

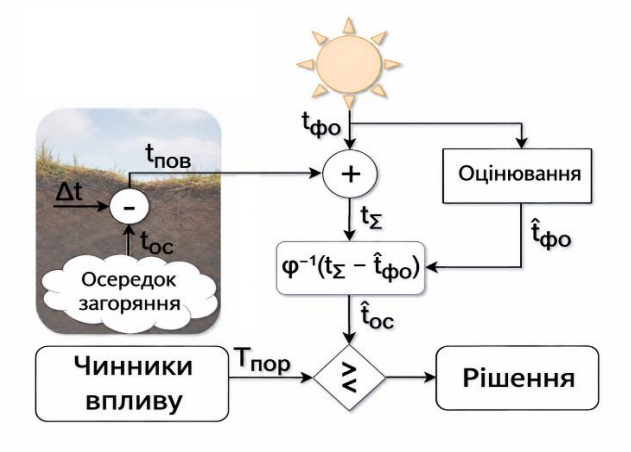


Рис. 1. Модель процесу виявлення теплової аномалії як ознаки прихованого осередку загоряння

Фонова температура земної поверхні $t_{фо}$ залежить від пори року, часу доби, а також багатьох природних чинників. Оцінка її величини $t_{фо}$ може бути розрахована як середня поточна температура по площі торфовища.

У межах площі проєкції осередку загоряння на земну поверхню температура буде становити величину

$$t_\Sigma = t_{фо} + t_{пов}. \qquad (2)$$

Знання величини $t_{фо}$ дає змогу, застосовуючи зворотний математичний оператор φ^{-1}, обчислити, з урахуванням виразу (2), прогнозну оцінку температури в осередку загоряння:

$$t_{ос} = \varphi^{-1}(t_\Sigma - t_{фо}). \qquad (3)$$

Рішення щодо розглядуваного осередка загоряння приймається шляхом порівняння отриманої прогнозної температури з пороговою температурою самозаймання: $\hat{t}_{ос} \gtrless T_{по}$. Перевищення порогу свідчить про небезпеку цього осередку.

При виявленні теплових аномалій як ознаки прихованих осередків загоряння за розглянутою моделлю основну проблему становить визначення вигляду математичного оператора φ, оскільки це потребує великого обсягу експериментальних досліджень з урахуванням різних типів торфу, стану його вологості, глибини залягання тощо.

Особливості побудови та умови застосування систем дистанційного обстеження торфовищ

Декомпозиція типової системи дистанційного обстеження торфовищ (Рис. 2) свідчить, що її складовими є безпілотний авіаційний комплекс (БпАК); бортова апаратура для знімання місцевості; зовнішній пілот (зовнішній пілот-оператор), що управляє польотом БпЛА через радіоканал за допомогою пульта дистанційного пілотування або наземного пункту управління; програмно-технічний комплекс тематичного оброблення даних обстеження, що отримуються від БпЛА.

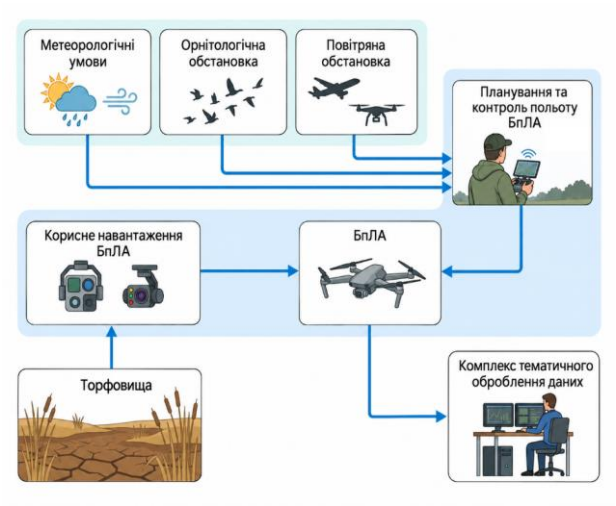


Рис. 2. Декомпозиція системи дистанційного обстеження торфовищ

БпАК може складатись з одного або кількох БпЛА. Управління польотом БпЛА літакового типу і роботою апаратури корисного навантаження забезпечує екіпаж у складі зовнішнього пілота і оператора корисного навантаження. За умов застосування БпЛА мультикоптерного типу зовнішній пілот-оператор управляє як польотом БпЛА, так і застосуванням апаратури корисного навантаження.

Якість управління польотом БпЛА залежить від наявності спеціальної фахової підготовки зовнішнього пілота (зовнішнього пілота-оператора) – базового кваліфікаційного рівня, його фізичного та психічного стану, практичної навченості управляти польотом БпЛА в різноманітних умовах (прості або складні метеоумови; час доби, наявність перешкод тощо), рівня майстерності володіння тактичними прийомами застосування БпЛА для виконання польотного завдання та виявлення місць прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торфовищ у різноманітних умовах (Мосов, 2019).

Метеорологічні умови (хмарність, туман, дощ, сніг, вітер) безпосередньо впливають на льотну експлуатацію БпЛА, бо можуть створювати різноманітні перешкоди. Це обумовлено вимогами щодо забезпечення безпеки польотів БпЛА в різноманітних погодних умовах, зокрема при виникненні різноманітних атмосферних явищ (пилова та піщана бурі, опади тощо) під час польоту. Від кваліфікації та практичного досвіду зовнішнього пілота (зовнішнього пілота-оператора) щодо управління польотом БпЛА в різноманітних метеорологічних умовах залежить кінцевий результат виконання ним поставлених завдань щодо обстеження і виявлення місць прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торфовищ.

Актуальним питанням залишається чутливість безпілотника до швидкості вітру та його поривів, що може призвести до втрати управління БпЛА в польоті, і, як наслідок, його аварії чи повної втрати при падінні на місцевість. При зростанні швидкості вітру управління БпЛА значно ускладнюється.

Пора року (зима, весна, літо й осінь) обумовлює різноманітність метеоумов та особливості пілотування, пов’язані з виникненням турбулентності атмосфери, що, своєю чергою, впливає на безпеку польоту БпЛА. На експлуатаційні можливості БпЛА також впливає зміна температурного режиму в повітряному просторі.

Слід зазначити, що зовнішній пілот (зовнішній пілот-оператор) має бути підготовлений для управління польотом БпЛА в умовах дня і ночі, бо час доби (денний час, сутінки, ніч) безпосередньо впливає на зміну освітленості місцевості та, відповідно, на можливість застосування апаратури БпЛА для обстеження.

Атмосфера є середовищем, через яке проходить випромінювання, що несе інформацію про об’єкти обстеження. Вона може послаблювати як пряме сонячне випромінювання (Рис. 2), так і випромінювання, відбите ґрунтом, шляхом його розсіювання. Також атмосфера може розсіювати власне теплове випромінювання торфовищ, обумовлене прихованими осередками загоряння (небезпечними тепловими аномаліями).

Ускладнення орнітологічної обстановки – наявність птахів у повітряному просторі (Рис. 2) – може створювати перешкоди для безпеки польоту БпЛА, що вимагає від зовнішнього пілота (зовнішнього пілота-оператора) її ретельного аналізу до початку польотів, а також у ході виконання польотного завдання. Атака птахів, особливо зграї, на БпЛА мультикоптерного типу може призвести до його аварії або втрати взагалі.

На виконання польоту БпЛА впливають його тактико-технічні характеристики, якими визначаються умови його льотної та технічної експлуатації: максимальний час неперервної роботи, енергозабезпечення, допустимі діапазони висот і температур повітря, максимально допустима швидкість вітру тощо.

Важливим елементом оперативного оцінювання з боку зовнішнього пілота (зовнішнього пілота-оператора) є повітряна обстановка під час виконання обстеження стану торфовищ, складність якої може бути обумовлена одночасною наявністю в несегрегованому повітряному просторі інших БпЛА та пілотованих повітряних суден або їх зближенням на небезпечну відстань.

Корисне навантаження БпЛА є надважливою складовою системи обстеження стану торфовищ, бо сам по собі безпілотник є лише повітряною платформою для транспортування цього навантаження.

Предметом обстеження є місця прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торфовищ, поява яких залежить від низки факторів: рельєфу місцевості, температури повітря, глибини залягання торфу і його вологості, періоду року, метеорологічних умов (опади, вітер), часу доби та рівня ґрунтових вод. Необхідна інформація може бути знайдена у відповідних базах даних, а за потреби мають проводитися відповідні вимірювання та обстеження за наявними методиками. Зокрема, для оцінювання глибини залягання торфу може бути застосована методика, наведена в (Comas et al., 2015), а для оцінювання рівня ґрунтових вод – методика, запропонована в (Li, L., et al., 2024).

Отже, інтеграція різної за принципом дії апаратури корисного навантаження на борту БпЛА дає змогу здійснювати всебічне і в режимі реального часу обстеження прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів. Отримані апаратурою корисного навантаження дані мають оброблюватися в наземному комплексі оброблення тематичної інформації в режимі часу, наближеному до реального. Для цього дані обстеження передаються з борту БпЛА на цей комплекс з подальшим обробленням за спеціальними алгоритмами з використанням відповідного програмного забезпечення і наданням інформації рятувальним службам (керівнику чи штабу операції з ліквідації надзвичайної ситуації) для ухвалення рішень щодо оперативного гасіння торф'яних загорянь чи ліквідації небезпечних теплових аномалій.

Важливе значення для виявлення й розпізнавання прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів має наявність бази відповідних сигнатур від видової та параметричної апаратури корисного навантаження в наземному комплексі оброблення за результатами попередніх польотів БпЛА на обстеження торфовищ. Це дасть змогу визначити найбільш інформативні спектральні діапазони електромагнітного спектра, в яких треба вести спостереження в умовах попередження виникнення торф'яних загорянь (небезпечних теплових аномалій) з метою максимізувати ймовірність та своєчасність їхнього виявлення.

Висновки і перспективи подальших досліджень

За матеріалами розглянутих літературних джерел можна констатувати, що безпілотні технології мають низку переваг і недоліків під час обстеження торфовищ та виявлення прихованих осередків загоряння.

Переваги:

1) завдяки дистанційному управлінню польотом БпЛА та відсутності потреби знаходитися в зонах підвищеного ризику забезпечується безпека особового складу;

2) матеріали аерознімання забезпечують проведення об'єктивного оцінювання ситуації, що склалася;

3) гнучкість та мобільність БпЛА дають змогу швидко переналаштувати їх на виконання нових завдань при зміні оперативної обстановки;

4) висока економічність (експлуатаційні витрати БпЛА на кілька порядків нижчі, ніж у супутникових систем).

Недоліки:

1) чутливість до погодних умов (сильний вітер, дощ, туман);

2) обмежені можливості при необхідності обстеження великих площ.

Обставиною, що утруднює подальше впровадження безпілотних технологій в Україні для виявлення пожежонебезпеки на торфовищах, є відсутність необхідної нормативно-правової бази та відповідних стандартів.

Перспективні напрями подальших досліджень:

створення адекватних фізичних моделей зміни теплової аномалії різних торф'яних ґрунтів для проведення експериментальних досліджень;

розроблення раціонального складу комплексу апаратури корисного навантаження БпЛА для виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів;

створення бази сигнатур від видової та параметричної апаратури корисного навантаження БпЛА для навчання зовнішніх пілотів (зовнішніх пілотів-операторів) з виявлення прямих і непрямих ознак прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів у ході виконання польотів БпЛА, а також фахівців наземних центрів оброблення даних обстеження;

розроблення технічних вимог до виду БпЛА, здатного виконувати завдання з виявлення прихованих осередків загоряння (небезпечних теплових аномалій) торф'яних ґрунтів в різноманітних метеорологічних умовах.

У підсумку зазначимо, що системна інтеграція БпЛА, тепловізійних даних та аналітики з використанням ШІ створює основу для нової ефективної моделі реагування на торф'яні пожежі, в якій рішення ухвалюються на основі достовірних та об'єктивних даних.

Внесок авторів: Концептуалізація – Михайло Попов (МП), Сергій Мосов (СМ) і Роман Пономаренко (РП); огляд публікацій – СМ і МП; Декомпозиція типової системи дистанційного обстеження торфовищ – СМ і РП; Висновки і перспективи подальших досліджень – СМ, МП і РП; підготовка тексту статті – МП; Всі автори прочитали та погодилися з фінальною версією рукопису.

Фінансування: Це дослідження не отримало зовнішнього фінансування.

Розкриття інформації про ШІ: під час підготовки цього рукопису генеративні інструменти штучного інтелекту не використовувались

Доступність даних: Дані можуть бути надані авторами статті за обґрунтованим запитом.

Подяки: Автори вдячні рецензентам і редакторам за їхні цінні коментарі, рекомендації та увагу до роботи.

Конфлікти інтересів: Автори заявляють, що не мають конфлікту інтересів.

Author Contributions: Conceptualization – Mykhailo Popov (MP), Sergey Mosov (SM) and Roman Ponomarenko (RP); review of publications – SM and MP; Decomposition of a typical remote sensing system for peatlands – SM and RP; Conclusions and prospects for further research – MP, SM and RP; Preparation of the paper text – MP. All authors have read and agreed with the final version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Disclosure of AI use: We confirm that no generative artificial intelligence tools were used in the preparation of this manuscript.

Data Availability Statement: The data can be provided by the authors of the paper upon reasonable request.

Acknowledgments: The authors are grateful to the reviewers and editors for their valuable comments, recommendations, and attention to this work.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Література

Аеророзвідка торфових пожеж в Україні: DroneUA інтегрує безпілотні технології для роботи ДСНС України (2016). Retrieved from https://drone.ua/ru/blogs/stati/droneua-integrates-drones-for-the-state-emergency-service-to-detect-peat-fires-in-ukraine].

Блажно, Н., Кіптач, Ф. (2012). Аналіз стану використання торфових ресурсів Львівської області. *Вісник Львів. ун-ту. Серія: Геогр.*, 40, ч. 1, 107–113.

Ліщенко, Л. П., Шевчук, Р. М., Філіпович, В. Є. (2022). Методика супутникового моніторингу торфовищ з метою визначення їх пожежонебезпечного стану та оцінювання ризиків виникнення пожеж на них. *Український журнал дистанційного зондування Землі,* 9(1), 16–25. doi:10.36023/ujrs.2022.9.1.210.

Мосов, С. П. (ред.) (2019). *Безпілотна авіація у військовій справі: колективна монографія*. Київ : Інтерсервіс.

Мосов, С. П., Нероба, В. Р., Селюков, О. В. (2020). Особливості застосування безпілотного літального апарата в надзвичайних ситуаціях. *Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(9), 34–40.

Попов, М. О., Пономаренко, Р. В., Мосов, С. П. (2026). Торф'яні пожежі як глобальна екологічна проблема. *Екологічна безпека та природокористування*, 2(58), 7–17. doi:10.32347/2411-4049.2026.2.7-17.

Artiushenko, M., Khyzhniak, A. (2020). Methodology of Fire Safety Monitoring for Peatlands Based on Satellite Survey. *Problems of Control and Informatics*, 65(4), 109–118. doi:10.1615/JAutomatInfScien.v52.i7.60.

Boroujeni, S. P. H., Razi, A., Khoshdel, S., Afghah, F., Coen, J. L., O'Neill, L. … Vamvoudakis, K. G. (2024). A comprehensive survey of research towards AI-enabled unmanned aerial systems in pre-, active-, and post-wildfire management. *Information Fusion*, 108, article 102369. doi:10.1016/j.inffus. 2024.102369.

Burke, C., Wich, S., Kusin, K., McAree, O., Harrison, M. E., Ripoll, B. … Longmore, S. (2019). Thermal-Drones as a Safe and Reliable Method for Detecting Subterranean Peat Fires. *Drones*, 3, 23. doi:10.3390/drones3010023.

Comas, X., Terry, N., Slater, L., Warren, M., Kolka, R., Kristiyono, A. … Darusman, T. (2015). Imaging tropical peatlands in Indonesia using ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity imaging (ERI): implications for carbon stock estimates and peat soil characterization X. *Biogeosciences*, 12, 2995–3007. doi:10.5194/bg-12-2995-2015.

Czapiewski, S., Szuminska, D. (2022). An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*, 11, 24. doi:10.3390/ land11010024.

Elbasit, A. M. A. M., Abutaleb, K. A. A., Grundling, A. (2024). Unmanned Aerial Vehicle for Peatland Degradation Assessment. *Space and Geospatial Technologies for the Africa We Want* (p. 319–330). doi:10.1007/978-3-031-64213-5_20.

Langhammer, J., Lendzioch, T., Vlček, L. (2024). Multispectral and thermal UAV monitoring of peatland response to climate warming. *Ecological Indicators*, 167, (October 2024):112587. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112587.

Li, Y., Henrion, M., Moore, A., Lambot, S., Opfergelt, S., Vanacker, V., Jonard, F. & van Oost, K. (2024). Factors controlling peat soil thickness and carbon storage in temperate peatlands based on UAV high-resolution remote sensing. *Geoderma*, 449(4):117009. doi: 10.1016/ j.geoderma.2024.117009/

Li, L., Sali, A., Liew, J. T., Saleh, N. L. & Ali, A. M. (2024). Machine Learning for Peatland Ground Water Level (GWL) Prediction via IoT System. *IEEE Access*, vol. 11. doi:10.1109/ACCESS.2024.3419237.

Meimetis, D., Papaioannou, S., Katsoni, P. & Lappas, V. (2024). An Architecture for Early Wildfire Detection and Spread Estimation Using Unmanned Aerial Vehicles, Base Stations, and Space Assets. *Drones and Autonomous Vehicles*, 1(1):10006-10006. doi:10.35534/dav.2024.10006.

Ramadan M. N. A., Basmaji, T., Gad A., Hamdan, H., Akgün, B. T., Ali, M. A. H., Alkhedher, M. & Ghazal, M. (2024). Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT. *Internet of Things*, 27, 101248. doi:10.1016/j.iot. 2024.101248.

Sam-Odusina, T., Perkasa, P., Chalmers, C., Fergus, P., Longmore, S. N. & Wich, S. A. (2025). Detection and Geolocation of Peat Fires Using Thermal Infrared Cameras on Drones. *Drones*, 9(7), 459. doi: 10.3390/drones9070459.

Scharlemann, J. P. W., Tanner, E. V. J., Hiederer, R., Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81–91. doi:10.4155/cmt.13.77.

References

Aerorozvidka torfovykh pozhezh v Ukraini: DroneUA intehruie bezpilotni tekhnolohii dlia roboty DSNS Ukrainy (2016). Retrieved from https://drone.ua/ru/blogs/stati/droneua-integrates-drones-for-the-state-emergency-service-to-detect-peat-fires-in-ukraine].

Artiushenko, M., Khyzhniak, A. (2020). Methodology of Fire Safety Monitoring for Peatlands Based on Satellite Survey. *Problems of Control and Informatics*, 65(4), 109–118. doi:10.1615/JAutomatInfScien.v52.i7.60.

Blazhno, N., Kiptach, F. (2012). Analiz stanu vykorystannia torfovykh resursiv Lvivskoi oblasti. *Visnyk Lviv. Un-tu. Seriia Heohr.*, 40. Ch. 1. 107–113. (in Ukrainian).

Boroujeni, S. P. H., Razi, A., Khoshdel, S., Afghah, F., Coen, J. L., O'Neill, L. … Vamvoudakis, K. G. (2024). A comprehensive survey of research towards AI-enabled unmanned aerial systems in pre-, active-, and post-wildfire management. *Information Fusion*, 108, article 102369. doi:10.1016/j.inffus. 2024.102369.

Burke, C., Wich, S., Kusin, K., McAree, O., Harrison, M. E., Ripoll, B. … Longmore, S. (2019). Thermal-Drones as a Safe and Reliable Method for Detecting Subterranean Peat Fires. *Drones*, 3, 23. doi:10.3390/drones3010023.

Comas, X., Terry, N., Slater, L., Warren, M., Kolka, R., Kristiyono, A. … Darusman, T. (2015). Imaging tropical peatlands in Indonesia using ground-penetrating radar (GPR) and electrical resistivity imaging (ERI): implications for carbon stock estimates and peat soil characterization X. *Biogeosciences*, 12, 2995–3007. doi:10.5194/bg-12-2995-2015.

Czapiewski, S., Szuminska, D. (2022). An Overview of Remote Sensing Data Applications in Peatland Research Based on Works from the Period 2010–2021. *Land*, 11, 24. doi:10.3390/ land11010024.

Elbasit, A. M. A. M., Abutaleb, K. A. A., Grundling, A. (2024). Unmanned Aerial Vehicle for Peatland Degradation Assessment. *Space and Geospatial Technologies for the Africa We Want* (p. 319–330). doi:10.1007/978-3-031-64213-5_20.

Langhammer, J., Lendzioch, T., Vlček, L. (2024). Multispectral and thermal UAV monitoring of peatland response to climate warming. *Ecological Indicators*, 167, (October 2024):112587. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112587.

Li, Y., Henrion, M., Moore, A., Lambot, S., Opfergelt, S., Vanacker, V., Jonard, F. & van Oost, K. (2024). Factors controlling peat soil thickness and carbon storage in temperate peatlands based on UAV high-resolution remote sensing. *Geoderma*, 449(4):117009. doi: 10.1016/ j.geoderma.2024.117009/

Li, L., Sali, A., Liew, J. T., Saleh, N. L. & Ali, A. M. (2024). Machine Learning for Peatland Ground Water Level

(GWL) Prediction via IoT System. *IEEE Access*, vol. 11. doi:10.1109/ACCESS.2024.3419237.

Lishchenko, L. P., Shevchuk, R. M., Filipovych, V. Ye. (2022). Metodyka suputnykovoho monitorynhu torfovyshch z metoiu vyznachennia yikh pozhezhonebezpechnoho stanu ta otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia pozhezh na nykh. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli*, 9(1), 16–25. doi:10.36023/ujrs.2022.9.1.210 (in Ukrainian).

Meimetis, D., Papaioannou, S., Katsoni, P. & Lappas, V. (2024). An Architecture for Early Wildfire Detection and Spread Estimation Using Unmanned Aerial Vehicles, Base Stations, and Space Assets. *Drones and Autonomous Vehicles*, 1(1):10006-10006. doi:10.35534/dav.2024.10006.

Mosov, S. P. (red.) (2019). Bezpilotna aviatsiia u viiskovii spravi: kolektyvna monohrafiia. Kyiv : Interservis. (in Ukrainian).

Mosov, S. P., Neroba, V. R., Seliukov, O. V. (2020). Osoblyvosti zastosuvannia bezpilotnoho litalnoho aparata v nadzvychainykh sytuatsiiakh. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka.* Kyiv: IDUNDTsZ, № 1 (9). S. 34-40. (in Ukrainian).

Popov, M.O., Ponomarenko, R.V., Mosov, S.P. (2026). Torf'yani pozhezhi yak hlobalna ekolohichna problema. *Ekolohichna bezpeka ta pryrodokorystuvannia*. 2(58). doi:10.32347/2411-4049.2026.2.7-17 (in Ukrainian).

Ramadan M. N. A., Basmaji, T., Gad A., Hamdan, H., Akgün, B. T., Ali, M. A. H., Alkhedher, M. & Ghazal, M. (2024). Towards early forest fire detection and prevention using AI-powered drones and the IoT. *Internet of Things*, 27, 101248. doi:10.1016/j.iot. 2024.101248.

Sam-Odusina, T., Perkasa, P., Chalmers, C., Fergus, P., Longmore, S. N. & Wich, S. A. (2025). Detection and Geolocation of Peat Fires Using Thermal Infrared Cameras on Drones. *Drones*, 9(7), 459. doi: 10.3390/drones9070459.

Scharlemann, J. P. W., Tanner, E. V. J., Hiederer, R., Kapos, V. (2014). Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management*, 5(1), 81–91. doi:10.4155/cmt.13.77.

FEATURES AND CONDITIONS OF APPLICATION OF UNMANNED TECHNOLOGIES FOR DETECTING HIDDEN FOCUSES OF IGNITION IN PEAT SOILS

Popov M. O.[1], https://orcid.org/0000-0003-1738-8227
Ponomarenko R. V.[2], https://orcid.org/0000-0001-8445-8251
Mosov S. P.[2], https://orcid.org/0000-0003-0833-3187
[1]*State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine», Olesia Honchara str., 55-b, Kyiv, 01054, Ukraine.*
[2]*Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Vyshhorodska str., 21, Kyiv, 04074, Ukraine.*

The paper is devoted to the consideration of the features and conditions of application of modern unmanned technologies to solve the urgent problem of detecting hidden sources of fire (dangerous thermal anomalies) of peat soils. A model of the process of detecting a thermal anomaly as a sign of a hidden source of fire is proposed. The features and conditions of application of unmanned technologies include: unmanned aerial vehicle (UAV), its tactical and technical specifications and on-board payload, meteorological and ornithological conditions, season, time of day, фуqualification level of the external pilot, air situation, and software and hardware complex for thematic processing of monitoring data. It is shown that meteorological conditions can create various obstacles in the process of flight operation of an UAV. Its sensitivity to speed and wind gusts can lead to the external pilot losing control of the UAV flight. Attention is focused on the fact that the season and time of day affect the quality of piloting, and are also associated with such a negative phenomenon as atmospheric turbulence. The tactical and technical characteristics of the UAV limit the possibilities of its flight operation and the performance of survey tasks at different times of the year and in different meteorological conditions. The importance of taking into account the ornithological situation, the complication of which may create obstacles to the safety of UAV flights in the study area is noted. An important element of the operational assessment by an external pilot is the air situation, which must be taken into account when conducting a survey of the condition of peatlands in non-segregated airspace. It is proven that the UAV payload is an extremely important component of the survey system in the interests of detecting hidden sources of ignition (dangerous thermal anomalies) of peat soils. Attention is focused on the feasibility of creating a database of signatures from species and parametric payload equipment in a ground processing complex based on the results of previous flights to survey the condition of peatlands. Conclusions are presented and prospects for further research are highlighted in the direction of identifying hidden sources of ignition (dangerous thermal anomalies) of peat soils in the interests of timely response to them by the rescue service.

Keywords: peat, fire, thermal anomaly, aerial survey, unmanned aerial vehicle, thermal imager

Рукопис статті отримано 09.07.2026
Надходження остаточної версії: 31.08.2026
Публікація статті: 30.09.2026
Received 09.07.2026
Revised 31.08.2026
Accepted 30.09.2026