

ВИКОРИСТАННЯ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТА АНАЛІЗУ ТОРФ'ЯНИХ ПОЖЕЖ НА ПРИКЛАДІ ПОЛТАВСЬКОЇ ОБЛАСТІ (СЕРПЕНЬ-ЛИСТОПАД 2024 РОКУ)

Мельник Ірина Геннадіївна,
кандидат географічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії, географії та наук про Землю
ДЗ «Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»
ORCID ID: 0000-0002-5349-0897

Стаття присвячена дослідженню торф'яних пожеж на території Полтавської області з використанням методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Торфовища є важливими екосистемами, які відіграють ключову роль у регулюванні водного балансу, збереженні біорізноманіття та накопиченні вуглецю. Проте, вони часто зазнають негативного впливу від пожеж, що призводить до екологічних та економічних збитків. У роботі розглянуто особливості торф'яних пожеж, їх причини та наслідки, а також можливості використання супутникових даних для їх моніторингу та аналізу. Дослідження проведено на прикладі Лубенського району Полтавської області, де за період з серпня по листопад 2024 року було зафіксовано 10 пожеж на нелісових торфовищах. Для моніторингу використовувалися супутникові знімки Sentinel-2 L2A, що дозволили виявити активні осередки горіння та згарища. Застосування мультиспектрального аналізу, зокрема каналів короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR), а також вегетаційного (NDVI), водного (NDWI) індексів, нормалізованого коефіцієнту горіння (NBR) та індексу зеленого хлорофілу (GCI), дало змогу оцінити ступінь пошкодження рослинності та гідрологічного режиму торфовищ. Результати дослідження підтвердили високу ефективність використання супутникових даних для моніторингу торф'яних пожеж та їх наслідків. Виявлення первинних осередків горіння є критично важливим для встановлення причин пожеж та планування протипожежних заходів. Аналіз часової динаміки NDVI показав суттєве погіршення стану рослинності після пожеж. Стаття підкреслює необхідність подальших досліджень з використанням методів ДЗЗ для моніторингу торф'яних пожеж, а також важливість поєднання супутникових даних з наземними та аерофізичними спостереженнями для отримання більш повної картини стану торфовищ.

Ключові слова: торф'яні пожежі, дистанційне зондування Землі, супутниковий моніторинг, Sentinel-2, NDVI, NDWI, NBR, GCI, Полтавська область, Лубенський район, екологічний моніторинг, мультиспектральний аналіз, SWIR, торфовища, екологічна безпека, пожежна безпека.

Melnyk Iryna. Satellite Data Application for Monitoring and Analyzing Peatland Fires in Poltava Region (August-November 2024)

The article is devoted to the study of peat fires in the Poltava region using remote sensing methods. Peatlands are important ecosystems that play a key role in regulating water balance, preserving biodiversity and accumulating carbon. However, they are often negatively affected by fires, which leads to environmental and economic damage. The paper considers the features of peat fires, their causes and consequences, as well as the possibilities of using satellite data for their monitoring and analysis. The study was conducted using the example of the Lubensky district of the Poltava region, where 10 non-forest peatland fires were recorded between August and November 2024. Satellite images of Sentinel-2 L2A were used for monitoring, which made it possible to detect active foci of combustion and burnt areas. The use of multispectral analysis, in particular the channels of the short-wave infrared range (SWIR), as well as vegetation (NDVI), water (NDWI) indices, Normalized Burn Ratio (NBR), and Green Chlorophyll Index (GCI), made it possible to assess the degree of damage to vegetation and the hydrological regime of peatlands. The results of the study confirmed the high efficiency of using satellite data to monitor peat fires and their consequences. The detection of primary combustion foci is critical for establishing the causes of fires and planning fire-fighting measures. The analysis of the NDVI time dynamics showed a significant decrease in the state of vegetation after fires. The article emphasizes the need for further research using remote sensing methods to monitor peat fires, as well as the importance of combining satellite data with ground and aerial observations to obtain a more complete picture of the state of peatlands.

Key words: peat fires, remote sensing, satellite monitoring, Sentinel-2, NDVI, NDWI, NBR, GCI, Poltava region, Lubensky district, environmental monitoring, multispectral analysis, SWIR, peatlands, environmental safety, fire safety.

Вступ. Торфовища – це унікальна природна система, яка часто недооцінюється, попри її величезне значення для екологічної рівноваги та сталого розвитку. Зазвичай до торфовищ відносять ділянки з потужністю торфу понад один метр [1]. Торфовища відіграють ключову роль у регулюванні балансу вуглецю та води, слугують джерелом органічної речовини, природним фільтром води та осередком біологічного різноманіття. Завдяки своїм властивостям, торф'яні масиви здатні регулювати водність річок

і озер, а також пом'якшувати вплив змін клімату. У періоди надмірних опадів вони поглинають надлишкову воду, захищаючи прилеглі населені пункти від повеней, а в посушливі періоди, навпаки, живлять річки та ґрунтові води [2]. Збереження та відновлення торфовищ має важливе значення в міжнародному контексті, що відображено в різних глобальних політичних рамках та конвенціях («Рамсарська конвенція» [3], «Глобальна ініціатива торфових боліт» (GPI) [4], Міжнародна група по охороні боліт (IMCG) [5] тощо).

Останніми десятиліттями, на тлі глобальних кліматичних змін, спостерігається зростання частоти пожеж на торфовищах. Коливання температурного режиму та режиму опадів, що спричинені цими змінами, призводять до висихання торфовищ і підвищення їх вразливості до загоряння. Зростання пожежної небезпеки зумовлене й низкою передумов, серед яких – зниження рівня ґрунтових вод через осушення боліт, надмірний видобуток підземних вод для побутових і сільськогосподарських потреб [6].

Причини загорань торф'яників різноманітні: від самозаймання та природних явищ, таких як блискавки, до антропогенних факторів, зокрема недбалості, навмисних підпалів та наслідків воєнних дій. Поширенню пожеж сприяє традиційне щорічне спалювання сухостоїв на пасовищах, стерні на орних землях, побутових відходів у домогосподарствах місцевого населення [7, с. 484]. Частота пожеж має виражену сезонну та міжрічну мінливість, що часто пов'язано з коливаннями погодних умов, особливостями рослинного покриву та джерелами займання [8].

Ключова відмінність торф'яних пожеж від лісових полягає у переважанні тління над відкритим горінням, що зумовлено внутрішньою вологістю та нестачею кисню в торфовому середовищі. Торфова пожежа може заглиблюватись, раптово спалахувати, змінювати напрямок, її важко гасити (вода часто не досягає глибинних шарів торфу, а лише випаровується) [1].

З екологічної точки зору, горіння торфовищ унаслідок пожеж можна розглядати як локальну екологічну кризу, що впливає на хімічний склад ґрунту, спричиняє деградацію й ерозію ґрунтово-земельних ресурсів, втрату біорізноманіття, забруднення атмосферного повітря та ґрунтів далеко за межами ділянки горіння [9; 10]. Пожежі суттєво та надовго змінюють динаміку екосистеми торфовищ, впливаючи на фізичну, хімічну й біологічну структуру ґрунту, його здатність поглинати та утримувати воду, змінювати гідрологічний режим. Дим торфовищ токсичніший, ніж від звичайної лісової пожежі. Він містить продукти неповного згоряння, серед яких – канцерогенний бензопірен, небезпечні оксиди сірки й азоту, важкі метали, дрібнодисперсні частинки золи (PM_{2.5} та PM₁₀) [9; 11]. Викиди негативно впливають на здоров'я людей. Через розміщення поблизу з перелогами, сільськогосподарськими угіддями або лісом, торфовища часто стають основою для розростання інших пожеж. На їх ліквідацію витрачається багато коштів та інших ресурсів [12]. У цілому, оцінювати ступінь пошкодження торфовищ складніше, ніж наслідки лісових пожеж.

Враховуючи специфіку торф'яних пожеж, традиційні методи їх попередження та виявлення часто виявляються неефективними та/або економічно невідповідними. Тому зростає значення сучасних технологій, таких як дистанційне зондування (ДЗЗ), тепловізійні технології та моделювання. Системи ДЗЗ, на відміну від контактних методів, оснащені багатоспектральними датчиками, що дозволяють регулярно знімати земну поверхню та отримувати дані про відбиту енергію в різних областях електромагнітного спектру.

Завдяки широкому охопленню, супутникові знімки роблять можливим оперативно досліджувати будь-які території, від глобальних до локальних, у режимі реального часу або з мінімальною затримкою. Це надає важливі матеріали для оцінки змін навколишнього середовища та прийняття рішень щодо його захисту та відновлення [13]. Дані ДЗЗ використовуються для управління пожежами, оцінки їх впливу та ліквідації, визначення причин пожеж, оцінки ризику та моніторингу відновлення торфовищ [8]. Проте, методи ДЗЗ мають обмеження. Висока хмарність, туман або сильне задимлення ускладнюють спостереження. Торф'яні пожежі, що тліють під землею на глибині до кількох метрів, не завжди виявляються супутниками [14]. Густий рослинний покрив може маскувати теплові аномалії. Для детального моніторингу невеликих осередків потрібні супутники з високою просторовою роздільною здатністю, дані яких обмежені доступністю. Оскільки торфовища мають різноманітний дистанційний образ (розорані, обводнені, вигорілі), супутникові дані необхідно поєднувати з наземними та аеровізуальними (включаючи БпЛА) спостереженнями для отримання об'єктивної картини.

Існуючі дослідження підтверджують ефективність використання методів дистанційного зондування (ДЗЗ) для оцінки наслідків лісових і торф'яних пожеж (Артюшенко М. В., Хижняк А. В., 2020; Ліщенко Л. П., Шевчук Р. М., Філіпович В. Є., 2022; Осадчий В. І., Орещенко А. В., Савенець М. В., 2023; Tomchenko O. V. et al., 2023; Chen Y., Morton D. C., Randerson J. T., 2024; Rostami A. et al., 2024) [14; 11; 6; 13; 8; 15]. Методи виявлення пожеж в основному базуються на аналізі теплових і спектральних смуг [6]. Детальні методичні прийоми моніторингу стану торфовищ за допомогою методів ДЗЗ з метою виявлення ризику пожеж висвітлені в працях Ліщенко Л. П., Пазинич Н. В., Шевчук Р. М., Філіпович В. Є. [1; 11]. Для визначення ступеня пошкодження рослинності та ґрунту від торф'яних пожеж успішно застосовуються мультиспектральні дані Sentinel-2 з платформи Copernicus Browser, як це показано в дослідженні Afina F., Syaafina L., & Sitanggang I. (2022) [16]. Ефективність супутникових знімків Sentinel-2 та індексів NBR і NDVI для оцінки тяжкості опіків підтверджена дослідженням Pádua L. et al. (2020) [17]. Придатність індексу NDWI для оцінки водовідштовхувальних властивостей ґрунту, спричинених пожежею, обґрунтована у публікації Lee K., Kim B., & Park S (2023) [18]. В Україні дослідження торф'яних пожеж методами ДЗЗ представлені фрагментарно, що може свідчити про недооцінення внеску невеликих, розкиданих у просторі пожеж торфовищ у стан загальної екологічної ситуації вразливих регіонів.

Матеріали і методи. Метою дослідження стало застосування методів дистанційного зондування Землі для моніторингу та аналізу наслідків пожеж на торфовищах на регіональному та локальному рівнях. Для пошуку наукових статей, що підтверджують ефективність використання методів дистанційного зондування для моніторингу торф'яних пожеж, було використано індекс GCL (Global Change Literature).

Полтавську область було обрано як приклад для вивчення торф'яних пожеж за допомогою методів ДЗЗ через її статус регіону з високим ризиком таких явищ. У межах області, особливо в північних та центральних районах, є значні площі торфовищ у заплавах річок, болотистих місцевостях та низинах. За даними науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту України, усього за період з 2004 по 2023 роки в Полтавській області відбулася 191 пожежа на нелісових торфовищах. За цим показником регіон посів 5 місце після Київської, Львівської, Волинської та Житомирської областей. У 2024 р. було зафіксовано 40 займань на торфовищах, що в 7 разів більше ніж у 2023 році [19]. Упродовж п'яти років (2019 – 2023 рр.) на Полтавщині вигоріло 247,9 га нелісових торфовищ.

Моніторинг торф'яних пожеж у дослідженні було обмежено територією Лубенського району Полтавської області та періодом спостережень – з серпня по листопад 2024 року. Джерелом інформації про пожежі слугували оперативні повідомлення ДСНС у Полтавській області, згідно яких упродовж цього періоду відбулось 10 пожеж на нелісових торфовищах. Для моніторингу осередків загорань було використано відкриті (некомерційні) супутникові дані платформи Copernicus Browser, а саме – високоякісні оптичні зображення Sentinel-2 (рівень L2A з атмосферною корекцією) з інтервалом зйомки в п'ять днів (для цілей активного пожежогасіння, чим своєчасніші дані, тим більша їх цінність). Супутник Sentinel-2 має просторову роздільну здатність в 10-20 м для використаних спектральних каналів.

Для ефективного виявлення активних осередків горіння та нещодавно утворених згаріщ було проаналізовано інфрачервоні знімки (передусім, короткохвильовий інфрачервоний SWIR, чутливий до теплового випромінювання та змін у структурі ґрунту) та мультиспектральні знімки (для більш точної оцінки стану

рослинності і ґрунту). Основним методом дослідження був мультиспектральний аналіз супутникових знімків Sentinel-2 L2A. Це дало змогу ідентифікувати майже в реальному часі більшість невеликих осередків пожеж, які могли бути непомітними у видимому спектральному діапазоні.

Для візуальної оцінки наслідків пожежі було задіяно інструменти для створення композитів та розрахунку індексів платформ Copernicus Browser [20] та Land Viewer [21]. Знімки аналізувались у картині композитів SWIR та False color, а також індексів NDVI (нормалізований диференційний вегетаційний індекс), NDWI (нормалізований диференційний водний індекс), NBR (нормалізований індекс горіння) та GCI (зелений індекс хлорофілу).

Результати. Одним із ключових завдань протипожежного моніторингу є локалізація та визначення масштабу пожеж [15], що було зроблено у процесі дослідження.

Як відомо, супутникові знімки у природних кольорах використовують лише видимий спектр світла, який не дозволяє виявити теплові аномалії, що є ключовим показником активної пожежі. Для ідентифікації пожеж у Лубенському районі супутникові знімки Sentinel-2 L2A переглядалися у покращеному зображенні SWIR, отриманому за допомогою комбінації спектральних каналів B12+B8A+B4. Ця комбінація може бути корисна, щоб оцінити вміст води в рослинах і ґрунті, а також – для виявлення слідів пожеж на пізніх стадіях.

На рис. 1 (а; б) представлено 2 супутникові знімки Sentinel-2_L2A території пожежі поблизу с. Заріччя, відкриті в композиті SWIR.

На знімку, що на рис. 1(а), добре ідентифікується початок пожежі торфовища з ознаками відкритого вогню. Виявлення первинного осередку загорання є критично важливим не лише для встановлення причин його виникнення, а й для оптимізації розподілу ресурсів, прогнозування напрямку поширення вогню

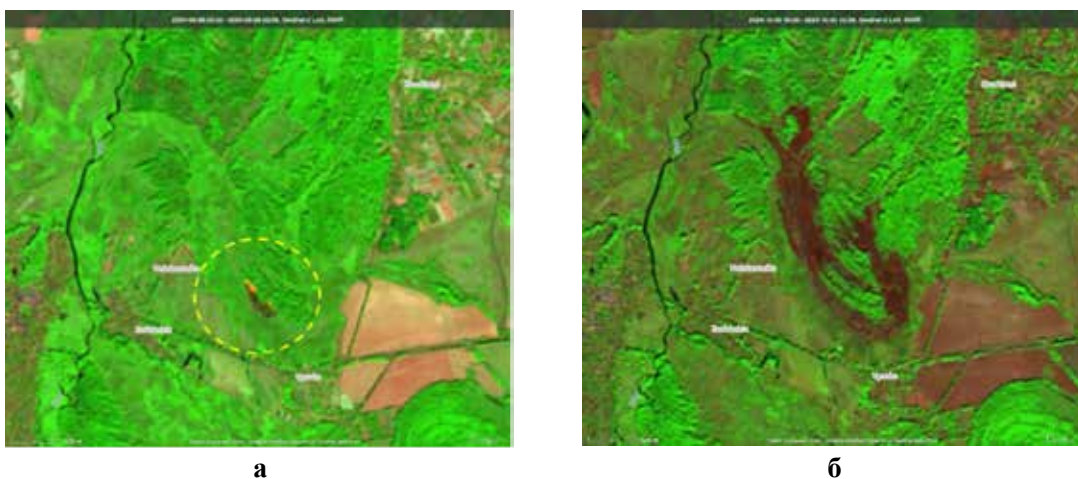


Рис. 1. Пожежа на торфовищі поблизу с. Заріччя Лубенського району:
а – знімок супутника Sentinel-2_L2A_SWIR від 28 вересня 2024 року
(первинний осередок займання); б – знімок супутника Sentinel-2_L2A_SWIR
від 20 жовтня 2024 року (згаріще від пожежі)

та вчасної евакуації населення у разі загрози. Знімок демонструє високий рівень продуктивності біомаси, що відображається у вигляді яскраво-зелених ділянок. На супутниковому знімку, представленому на рис. 1(б), відображено наслідки пожежі, що охопила близько 20 гектарів торфовища. Згарище виглядає як темно-коричнева пляма. Коричневий колір свідчить про повне згорання торфу та знищення рослинності.

Відзначимо, що існують альтернативні комбінації спектральних каналів, придатні для детектування опіків, спричинених пожежами. Зокрема, у композиті False Color (рис. 2(а)) здорова рослинність відображається червоними відтінками, тоді як згарище набуває насиченого темно-коричневого або чорного кольору. Світло-червоними тонами на знімку візуалізується трав'яниста або чагарникова рослинність, темнішими червоними – хвойні ліси. Однак, зазначена колірна комбінація є менш інформативною для візуальної інтерпретації порівняно з композитом SWIR та може ускладнити ідентифікацію осередків пожеж невеликої площі.

На відміну від False Color, на супутниковому знімку в картині SWIR, що на рис. 2(б), коричневий опік від пожежі поблизу с. Нетратівка (долина річки Удай) вдало контрастує із здоровою (яскраво-зеленою) рослинністю, не зачепленою пожежею.

Торф'яні пожежі характеризуються підповерхневим горінням, що ускладнює їх візуальне розпізнавання. Однак, комбінація каналів B12 (SWIR) + B11 (SWIR) + B8A (NIR) супутникового знімка Sentinel-2 L2A дозволяє виявити ділянки, де торф'яний шар зазнав впливу вогню, навіть за умови збереження надземного рослинного покриву, що видно з рис. 3 (а; б). Цей композит спектральних каналів, як і композит SWIR, ефективно відображає осередки відкритого вогню, що особливо важливо для моніторингу активної фази пожежі (рис. 3(а)).

Із 10-ти пожеж, що сталися на торфовищах у Лубенському районі в серпні-листопаді 2024 році, вдалося ідентифікувати вісім. Сприятливим фактором для їх ідентифікації стали метеорологічні умови, зокрема відносно безхмарна і суха погода у зазначений період.



Рис. 2. Згарище на торфовищі біля с. Нетратівка:
а – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_False color від 20 жовтня 2024 року;
б – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_SWIR від 20 жовтня 2024 року

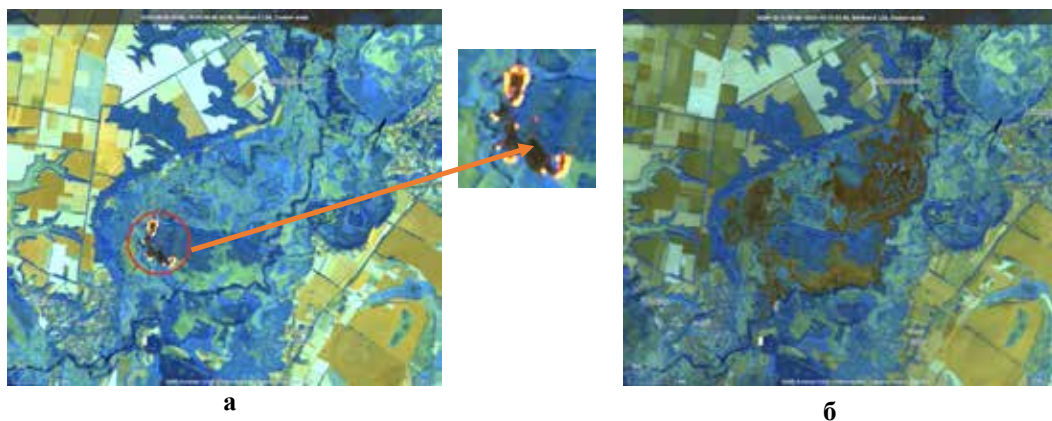


Рис. 3. Пожежа поблизу с. Мацкова Лучка:
а – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_Custom_12-11-8A від 28 вересня 2024 р. (первинний осередок займання з елементами відкритого вогню); б – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_Custom_12-11-8A від 10 жовтня 2024 р. (згарище від пожежі)

Невеликі пожежі, що швидко були ліквідовані і залишили після себе згарище площею менше 1 га, не вдалось виявити на супутникових знімках Sentinel-1-2. Однею з причин цього є те, що період знімання не співпадав з періодом пожеж на досліджуваній території.

Наступні супутникові зображення наочно демонструють можливості методів ДЗЗ у виявленні наслідків пожеж на нелісових торфовищах.

Пожежа викликає різке погіршення стану рослинного покриву, що візуалізується через зниження значень нормалізованого диференційного вегетаційного індексу (NDVI) на супутникових знімках, отриманих до та після події. Розглянемо, як це працює, на прикладі пожежі торфовища біля с. Нетратівка. Здорова рослинність (насичений темно-зелений колір, NDVI наближається до 1,0) видна на рис. 4(а) (ситуація до пожежі). Після пожежі індекс NDVI суттєво знизився (ділянки, що до пожежі були темно-зеленими, набули жовтуватих відтінків, що на шкалі відповідає показнику 0-0,2). Зни-

ження значень NDVI (рис. 4(б)) свідчить про утворення оголених ділянок або ділянок з незначними залишками рослинності. Як вже зазначалось, надземна біомаса водно-болотної рослинності прямо вказує на здоров'я екосистеми водно-болотних угідь і має вирішальне значення для очищення води, циклу вуглецю та збереження біорізноманіття. Якщо ця біомаса втрачається, стан екосистеми закономірно погіршується (рис. 4).

Наступна пожежа, що зафіксована поблизу с. Староаврамівка Лубенського району, представлена на супутникових знімках у композиті SWIR (рис. 5(а)) та в картині нормалізованого диференційного водного індексу NDWI (рис. 5(б)). Останній індекс використовується для виявлення та моніторингу змін вмісту води в рослинності та ґрунті. Аналіз обох знімків демонструє ідентичність контурів постраждалої ділянки, що підтверджує ефективність індексу NDWI для точного визначення периметру і площі утвореного згарища. Пожежі спричиняють порушення природного гідроло-

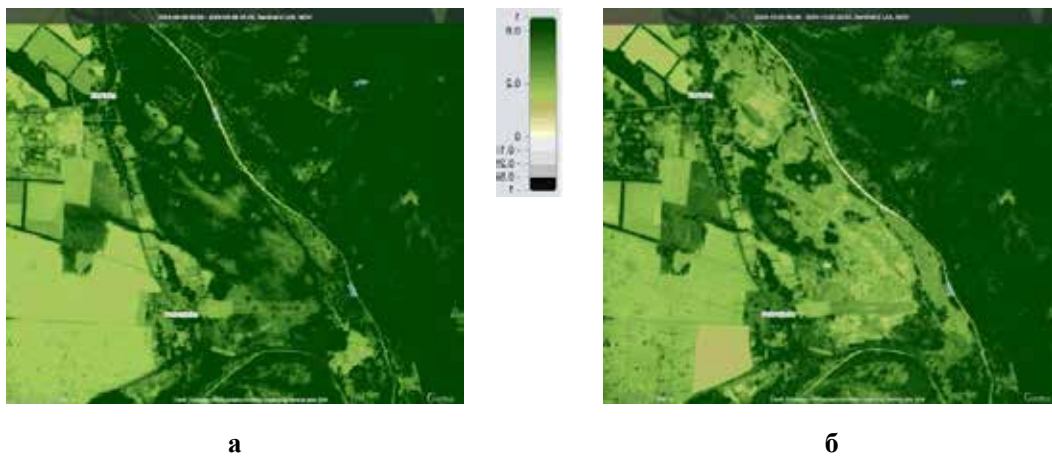


Рис. 4. Ділянка торфовища поблизу с. Нетратівка:
а – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_NDVI від 28 вересня 2024 р. (до пожежі);
б – Супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_NDVI від 20 жовтня 2024 р. (після пожежі)



Рис. 5. Пожежа на торфовищі поблизу с. Староаврамівка Лубенського району:
а – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_SWIR від 15 вересня 2024 р.;
б – супутниковий знімок Sentinel-2_L2A_NDWI від 20 вересня 2024 р.
 (демонструє ступінь висихування ґрунту на згарищах)



Рис. 6. Контрольна ділянка в межах згарища на схід від с. Староаврамівка Лубенського району в картині індексу NDVI від 15 вересня 2024 р.

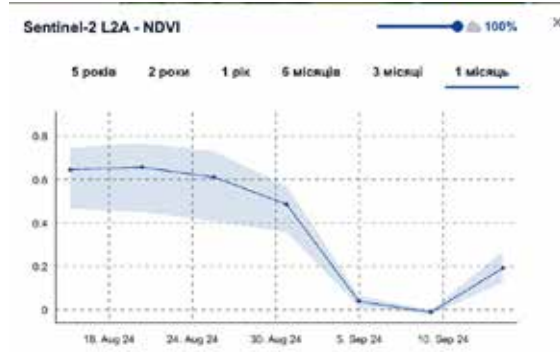


Рис. 7. Графік динаміки індексу NDVI впродовж місяця (серпень-вересень) на контрольній ділянці східніше с. Староаврамівка Лубенського району

гічного режиму торфовищ, що проявляється у змінах рівня ґрунтових вод та впливі на водні об'єкти. Значення NDWI дозволяють оцінити ступінь висушування торфовищ та, відповідно, рівень їх пошкодження.

З метою верифікації зниження вегетаційного індексу NDVI внаслідок пожежі, було обрано контрольну ділянку на супутниковому знімку Sentinel-2 L2A (рис. 6). Для цієї ділянки побудовано графік часової динаміки NDVI (рис. 7), що відображає зміни індексу впродовж місяця (серпень-вересень). Аналіз графіку демонструє чітку тенденцію до зниження значень NDVI після пожежі. Це підтверджує, що пожежа призвела до

суттєвого зменшення кількості рослинності та її стану на досліджуваній території. Зниження NDVI є прямим наслідком знищення рослинності та пошкодження ґрунтового покриву внаслідок дії вогню.

Зазначимо, що для вивчення ступеня пошкодження рослинності нарівні з нормалізованим вегетаційним індексом можна використовувати індекс зеленого хлорофілу GCI, який вважається більш чутливим до стану здоров'я рослин, ніж NDVI. Так, GCI допомагає виявити приховані пошкодження рослинності, які можуть бути невидимі на NDVI. Якщо торф'яна пожежа прихована (глибинна), це позначиться на значенні індексу. Періо-

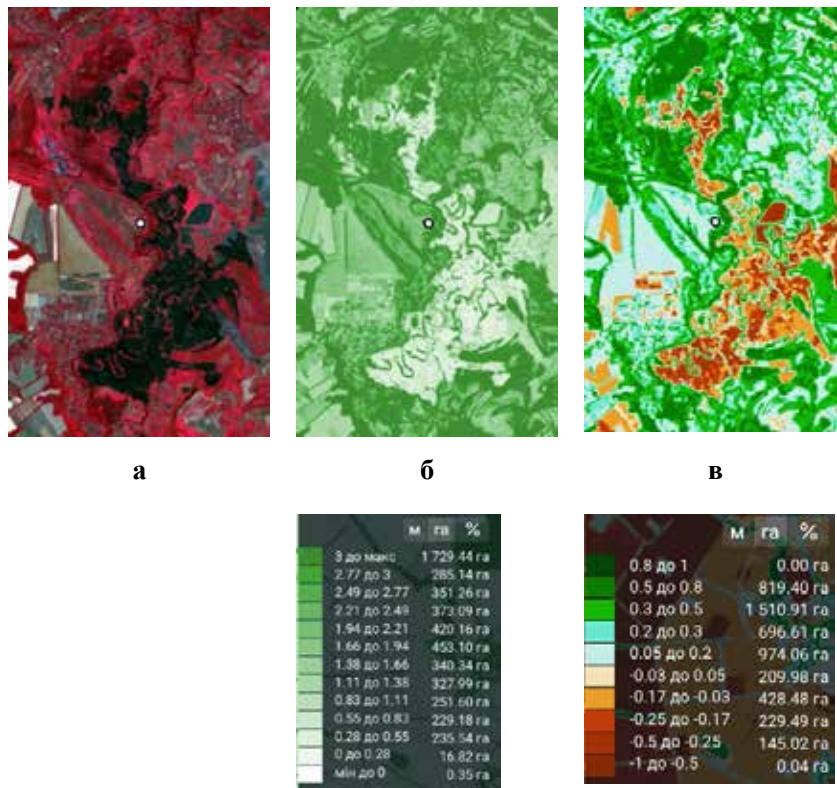


Рис. 8. Згарище від пожежі торфовища поблизу с. Єрківці. Супутниковий знімок Sentinel-2 L2A від 20 вересня 2024 р., відображений у вигляді: а – композиції False color; б – індексу GCI; в – індексу NBR

дичні вимірювання GCI дозволяють відстежувати динаміку відновлення рослинності. Це може представляти особливий інтерес для об'єктів природно-заповідного фонду з торфовищами. Інтерпретація значень GCI вимагає врахування конкретних умов досліджуваної території та типу рослинності.

Стандартним перевіреним підходом для оцінки площ та серйозності опіку є застосування нормалізованого коефіцієнту горіння (NBR) [9]. Формула для його обчислення поєднує використання ближнього інфрачервоного (NIR) і короткохвильового інфрачервоного (SWIR) довжин хвиль:

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR).$$

Застосування інструментарію платформи Land-Viewer [21] дозволило здійснити аналіз супутникового знімка згарища торфовища поблизу с. Єрківці Лубенського району з використанням композиції False color та індексів GCI і NBR (рис. 8).

На рисунку 8(в) червоним кольором позначено ділянки з максимальним ступенем термічного ураження (повна деструкція рослинного покриву та значні пошкодження ґрунту, значення індексу NBR в діапазоні від -0,25 до -1,0); насиченим зеленим кольором – ділянки, що не зазнали впливу вогню, з неущодженим рослинним покривом (значення індексу NBR в діапазоні від 0,3 до 1,0).

Висновки. Результати проведеного дослідження підтвердили високу ефективність використання супут-

никових даних Sentinel-2 L2A для моніторингу та аналізу наслідків торф'яних пожеж на регіональному рівні. Мультиспектральний аналіз з використанням каналів короткохвильового інфрачервоного діапазону (SWIR) дозволив виявити активні осередки горіння та утворені згарища, що є критично важливим для організації протипожежних заходів. Вигорілі ділянки площею менше 1 га виявити на супутникових знімках не вдалось. Використання вегетаційного (NDVI), водного (NDWI), нормалізованого коефіцієнту горіння (NBR) та індексу зеленого хлорофілу (GCI) забезпечило можливість кількісної оцінки ступеня пошкодження рослинності та гідрологічного режиму торфовищ. Аналіз часової динаміки NDVI показав суттєве погіршення стану рослинності після пожеж. У підсумку, порівняння одного і того ж супутникового знімка згарища в різних індексах дозволило отримати комплексну картину наслідків пожежі та оцінити різні аспекти пошкоджень. Отримані результати можуть бути використані для: розробки системи оперативного моніторингу торф'яних пожеж; оцінки екологічних збитків від пожеж; планування заходів з відновлення торфовищ.

Для підвищення ефективності супутникового моніторингу рекомендується поєднувати супутникові дані з наземними та аеровізуальними спостереженнями, а також використовувати супутникові знімки з високою просторовою роздільною здатністю для моніторингу невеликих осередків пожеж.

Література:

1. Ліщенко Л. П., Пазинич Н. В. Моніторинг стану торфовищ для виявлення пожежонебезпечних ділянок за допомогою дистанційних методів. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2016. № 8. С. 29–39. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.210>
2. Lyalko V., Dugin S. S., Sybirtseva O. M., Dorofey Y., Orlenko T. On the Possibility of Identifying Peatland Features Using Remote Sensing Data. *Geological Journal*. 2023. P. 61–78. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>
3. Convention on Wetlands [Електронний ресурс]. URL: <https://www.ramsar.org/>
4. Global Peatlands Initiative [Електронний ресурс]. URL: <https://globalpeatlands.org/>
5. International Mire Conservation Group (IMCG) [Електронний ресурс]. URL: <https://www.imcg.net/>
6. Осадчий В., Орещенко А., Савенець М. Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря: монографія. Київ: ДСНС України, НАН України, УкрГМІ, 2023. 256 с.
7. Fesyuk V., Moroz I., Chyzhevska L., Karpiuk Z., Polianskyi S. Burned peatlands within the Volyn region: state, dynamics, threats, ways of further use. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*. 2020. № 29(3). P. 483–494. DOI: <https://doi.org/10.15421/112043>
8. Chen Y., Morton D. C., Randerson J. T. Remote sensing for wildfire monitoring: Insights into burned area, emissions, and fire dynamics. *One Earth*. 2024. Vol. 7, № 6. P. 1022–1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.05.014>
9. Saputra A., Setiabudidaya D., Setyawan D., Khakim M. Y. N., Iskandar I. Burnscar Analysis Using Normalized Burning Ratio (NBR) Index During 2015 Forest Fire at Merang-Kepahyang Peat Forest, South Sumatra, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*. 2017. Vol. 1857. P. 100001. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4987107>
10. Schroeder W., Oliva P., Giglio L., Quayle B., Lorenz E., Morelli F. Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 185. P. 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.032>
11. Ліщенко Л. П., Шевчук Р. М., Філіпович В. Є. Методика супутникового моніторингу торфовищ з метою визначення їх пожежонебезпечного стану та оцінювання ризиків виникнення пожеж на них. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2022. Т. 9, № 1. С. 16–25. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001316327>
12. Несен І., Слагін Г., Алексеева О., Ножко І., Куценко М., Алексеев А. До проблеми попередження пожеж на торфовищах. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. № 6(1). С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.46-50>
13. Tomchenko O. V., Khyzhniak A., Sheviakina N., Zahorodnia S., Yelistratova L., Yakovenko M., Stakhiv I. Assessment and monitoring of fires caused by the War in Ukraine on Landscape scale. *Journal of Landscape Ecology*. 2023. Vol. 16. P. 76–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0011>
14. Artiushenko M. V., Khyzhniak A. V. Methodology of Fire Safety Monitoring for Peatlands Using Space Survey. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2020. № 52(7). P. 63–73. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i7.60>

15. Rostami A., Shah-Hosseini R., Asgari S., Zarei A., Aghdami-Nia M., Homayouni S. Active Fire Detection from Landsat-8 Imagery Using Deep Multiple Kernel Learning. *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14, № 4. P. 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14040992>
16. Afina F., Syaufina L., & Sitanggang I. (2022). Forest and Peatland Fire Severity Assessment at Siak Regency, Riau Province using Sentinel-2 Imagery. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan* (Journal of Natural Resources and Environmental Management), 2022. №11(4). P. 621–630. DOI: <https://doi.org/10.29244/jpsl.11.4.621-630>
17. Pádua L., Guimarães N., Adão T., Sousa A., Peres E., & Sousa J. J. Effectiveness of Sentinel-2 in Multi-Temporal Post-Fire Monitoring When Compared with UAV Imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. №9(4). P. 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9040225>
18. Lee K., Kim B., & Park S. Evaluating the potential of burn severity mapping and transferability of Copernicus EMS data using Sentinel-2 imagery and machine learning approaches. *GIScience & Remote Sensing*. 2023. №60(1). 2192157. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2192157>
19. Семисал К., Весна Т. «Вогонь на великій глибині»: на Полтавщині майже у сім разів збільшилась кількість торф'яних пожеж. *Суспільне Полтава*. 2024. 04 жовт. URL: <https://suspilne.media/poltava/850953-vogon-na-velikij-glibini-na-poltavsini-majze-u-sim-raziv-zbilsilas-kilkist-torfanih-pozez/>
20. Copernicus Browser [Електронний ресурс]. <https://dataspace.copernicus.eu/>
21. Land Viewer [Електронний ресурс]. <https://eos.com/landviewer/>

References:

1. Lishchenko, L. P., & Pazynych, N. V. (2016). Monitoring stanu torfovishch dlia vyavlennia pozhezho-nebezpechnykh dilianok za dopomohoiu dystantsiinykh metodiv [Monitoring of peatlands to identify fire-hazardous areas using remote methods]. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8, 29–39. DOI: <https://doi.org/10.36023/ujrs.2016.8.72>. [in Ukrainian]
2. Lyalko, V. I., Dugin, S. S., Sybirtseva, O. M., Dorofey, E. M., Golubov, S. I., & Orlenko, T. A. (2023). On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geological Journal*, 61–78. DOI: <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>
3. Convention on Wetlands. (n.d.). URL: <https://www.ramsar.org/>
4. Global Peatlands Initiative. (n.d.). URL: <https://globalpeatlands.org/>
5. International Mire Conservation Group (IMCG). (n.d.). URL: <https://www.imcg.net/>
6. Osadchyi, V., Oreshchenko, A., & Savenets, M. (2023). Suputnykovyi monitorynh pozhez i zabrudnennia atmosferoho povitria: monohrafiia [Satellite monitoring of fires and air pollution: monograph]. DSNS Ukrainy, NAN Ukrainy, UkrHMI. [in Ukrainian]
7. Fesyuk, V., Moroz, I., Chyzhevska, L., Karpiuk, Z., & Polianskyi, S. (2020). Burned peatlands within the Volyn region: State, dynamics, threats, ways of further use. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29(3), 483–494. DOI: <https://doi.org/10.15421/112043>
8. Chen, Y., Morton, D. C., & Randerson, J. T. (2024). Remote sensing for wildfire monitoring: Insights into burned area, emissions, and fire dynamics. *One Earth*, 7(6), 1022–1028. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.05.014>
9. Saputra, A., Setiabudidaya, D., Setyawan, D., Khakim, M. Y. N., & Iskandar, I. (2017). Burnscar analysis using normalized burning ratio (NBR) index during 2015 forest fire at Merang-Kepahyang peat forest, South Sumatra, Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, 1857, 100001. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4987107>
10. Schroeder, W., Oliva, P., Giglio, L., Quayle, B., Lorenz, E., & Morelli, F. (2016). Active fire detection using Landsat-8/OLI data. *Remote Sensing of Environment*, 185, 210–220. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.08.032>
11. Lishchenko, L. P., Shevchuk, R. M., & Filipovych, V. Ye. (2022). Metodyka suputnykovoho monitorynhu torfovishch z metoiu vyznachennia yikh pozhezho-nebezpechnoho stanu ta otsiniuvannia ryzykiv vynyknennia pozhez na nykh [Methodology of satellite monitoring of peatlands to determine their fire-hazardous state and assess the risks of fires on them]. *Ukrainskyi zhurnal dystantsiinoho zonduvannia Zemli*, 9(1), 16–25. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001316327>. [in Ukrainian]
12. Nesen, I., Yelagin, H., Alekseeva, O., Nozhko, I., Kutsenko, M., & Alekseev, A. (2022). Do problemy poperedzhennia pozhez na torfovishchakh [On the problem of peatland fire prevention]. *Nadzvychni situatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia*, 6(1), 69–74. DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.2.46-50>. [in Ukrainian]
13. Tomchenko, O. V., Khyzhniak, A. V., Sheviakina, N. A., Zahorodnia, S. A., Yelistratova, L. A., Yakovenko, M. I., & Stakhiv, I. R. (2023). Assessment and monitoring of fires caused by the War in Ukraine on landscape scale. *Journal of Landscape Ecology*, 16, 76–97. DOI: <https://doi.org/10.2478/jlecol-2023-0011>
14. Artiushenko, M. V., & Khyzhniak, A. V. (2020). Methodology of fire safety monitoring for peatlands using space survey. *Journal of Automation and Information Sciences*, 52(7), 63–73. DOI: <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v52.i7.60>
15. Rostami, A., Shah-Hosseini, R., Asgari, S., Zarei, A., Aghdami-Nia, M., & Homayouni, S. (2022). Active fire detection from Landsat-8 imagery using deep multiple kernel learning. *Remote Sensing*, 14(4), 992. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14040992>
16. Afina F., Syaufina L., & Sitanggang I. (2022). Forest and Peatland Fire Severity Assessment at Siak Regency, Riau Province using Sentinel-2 Imagery. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan* (Journal of Natural Resources and Environmental Management), 11(4), 621–630. DOI: <https://doi.org/10.29244/jpsl.11.4.621-630>
17. Pádua, L., Guimarães, N., Adão, T., Sousa, A., Peres, E., & Sousa, J. J. (2020). Effectiveness of Sentinel-2 in multi-temporal post-fire monitoring when compared with UAV imagery. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(4), 225. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9040225>

18. Lee, K., Kim, B., & Park, S. (2023). Evaluating the potential of burn severity mapping and transferability of Copernicus EMS data using Sentinel-2 imagery and machine learning approaches. *GIScience & Remote Sensing*, 60(1), 2192157. DOI: <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2192157>
19. Semysal, K., & Vesna, T. (2024, October 4). «Vohon na velykii hlybyni»: na Poltavshchyni maizhe u sim raziv zbilshylas kilnist torfianykh pozhezh [«Fire at great depth»: the number of peat fires in the Poltava region has almost increased sevenfold]. *Suspilne Poltava*. URL: <https://suspilne.media/poltava/850953-vogon-na-velikij-glibini-na-poltavsini-majze-u-sim-raziv-zbilshylas-kilnist-torfanih-pozez/>. [in Ukrainian]
20. Copernicus Browser. (n.d.). URL: <https://dataspace.copernicus.eu/>
21. Land Viewer. (n.d.). URL: <https://eos.com/landviewer/>