



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.210>

УДК 504.064.3:528.8:[553.97(0492)] (477)

Методика супутникового моніторингу торфовищ з метою визначення їх пожежонебезпечного стану та оцінювання ризиків виникнення пожеж на них

Л. П. Ліщенко*, Р. М. Шевчук, В. Є. Філіпович

ДУ “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України”, вул. Олеся Гончара, 55-Б, Київ, 01054, Україна

Тривалі посушливі весняно-осінні періоди, що стають все частішими для Поліської зони України, сприяють виникненню пожеж насамперед на торфовищах, що є небезпечним як для здоров'я людей, так і екосистеми загалом. Прогнозування ризиків виникнення подібних надзвичайних ситуацій потребує моніторингових досліджень потенційно небезпечних об'єктів з метою виявлення цих ситуацій на ранніх стадіях. З іншої сторони, супутниковий моніторинг забезпечує достовірну картину лиха і дає змогу реально оцінити величину отриманих збитків. У статті досліджуються чинники, які потрібно враховувати під час дистанційного моніторингу пожежонебезпечності заторфованих заплав, та розглядаються оптимальні методи цифрової обробки багатоспектральних супутникових даних (серія космічних знімків Landsat, Sentinel) у комплексі з традиційними статистичними даними. Пропонується методико-технологічна схема виконання цих досліджень. Для оцінювання ризиків визначаються показники, які можна одночасно отримати за допомогою супутникових даних на великих площах: вологість торфового ґрунту, температура прогріву поверхні торфовища, спектральні індекси (водні, ґрунтові), евапотранспірація. Визначаються сезони найбільших ризиків виникнення пожеж, а також ризики, пов'язані з антропогенним впливом (близькість до населених пунктів, сільгоспроботи, необережне поводження з вогнем та підпали). Стан торфовищ діагностується за розробленими критеріями і оцінюється за чотирма ступенями ризику виникнення пожеж – критичний, високий, низький та незначний. Дослідження спектральних індексів показало, що за допомогою ґрунтового індексу SAVI в комплексі з аналізом поверхневої температури впевнено картографуються місця згаріщ і пожеж у реальному часі. Для прогнозування виникнення пожежонебезпечних ситуацій запропоновано застосування у комплексі з тепловою зйомкою двох варіантів нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI). На тестових ділянках наведено приклади діагностування пожеж і згаріщ на торфовищах та приклади прогнозування пожежонебезпечних ситуацій, що потребують пильної уваги місцевої влади. Надані рекомендації щодо запобігання виникненню надзвичайних ситуацій, пов'язаних з горінням торфовищ.

Ключові слова: торфовища, багатоспектральні супутникові дані, тепловий діапазон, спектральні індекси, пожежонебезпечність.

© Л. П. Ліщенко*, Р. М. Шевчук, В. Є. Філіпович. 2022

Вступ

Швидкоплинним процесом, що впливає на довкілля і створює негативні наслідки для людини, є пожежі. Вони швидко змінюють образи природних ландшафтів. За даними МНС України пожежі в природних екосистемах можна поділити на лісові, торф'яні та сільськогосподарські підпали трави. Такі явища виникають за певних обставин і умов, на них впливає як суб'єктивний (людина) так і об'єктивний фактор (природні умови). Пожежі виникають по всій території України і частіше відбуваються у спекотні сезони і більш засушливі роки з підвищеною температурою повітря. Поширення торф'яних пожеж тісно корелюється з природними умовами і за фізико-географічним положенням тяжіє до Полісся, де торфовища значно поширені. В більшості випадків вони були меліоровані та осушені, що значно збільшило ризики виникнення пожежонебезпечних ситуацій. В Україні існує близько 1 млн. га осушених торфовищ, основна

частина яких знаходиться на правобережному Поліссі (Геоінформ України, 2005).

У результаті пожеж на торфовищах в атмосферу надходять вуглекислий газ CO₂, окис азоту NO, діоксид сірки SO₂, ряд органічних сполук – аміак NH₃, формальдегід H₂CO (Smith et al., 2018; Stockwell et al., 2014), бензапірен C₂OH₁₂ (Kong et al., 2021) та зважені частки, що негативно впливають на стан дихальної системи людини. Торф містить до 25 відсотків бітумів, які під час пожежі зосереджуються біля охопленої полум'ям поверхні, а в результаті охолодження її водою цементують частинки вугілля. Відтак утворюється водонепроникний шар, а під ним залишається жевріння, що можливе через невисокий вміст кисню в товщі. Це явище ускладнює гасіння, оскільки вода не може проникнути до осередку пожежі. Щоб запобігти новим загоранням, потрібно обводнювати торфовища, тобто запустити процес, протилежний осушуванню.

* E-mail: Lischenko.lp@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6766-6884>

На торфовищах, поширених на територіях, що постраждали від аварії на ЧАЕС встановлено, що максимальне накопичення цезію 137 – одного з найбільш рухомих радіонуклідів зафіксовано лише на глибині 2–6 см від поверхні (Гаркавий, 2002). Таке відносно неглибоке залягання максимальних забруднень є потенційною загрозою розповсюдження їх зі стоком вод під час повеней або атмосферних опадів та під час пожеж. Надходження значної кількості сполук азоту і фосфору з прогорілого торфу у річкову мережу може призвести до евтрофікації водних об'єктів та різкого зниження якості річкових вод. Тривале тління торфу має негативні наслідки для довкілля далеко за межами ділянки горіння. Глибоке горіння торфу вивільнює тисячолітні накопичення вуглецю, які досі не були частиною активного вуглецевого циклу і утворений надлишок вуглецю не може бути засвоєний живими організмами та рослинністю (Ліщенко та ін., 2016).

Сьогодні збір статистичної інформації щодо пожеж у природних екосистемах України на національному рівні здійснюють Державна служба статистики України (Держстат України) та Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС). Нажаль, ця робота має періодичний характер і не завжди пожежі на торфовищах відокремлюються від лісових пожеж (див. щоквартальні інформаційно-аналітичні довідки про виникнення надзвичайних ситуацій в Україні <https://www.dsns.gov.ua/ua/Dovidka-za-kvartal/>). Для торфовищ важливим, насамперед, є прогнозування пожежонебезпечної ситуації на великих площах. За таких умов пропонується система супутникового моніторингу торфовищ з метою виявлення та попередження пожеж, аналізу негативних наслідків та розрахунку збитків. Існуючі картографічні матеріали мають значні розбіжності з оперативними отриманими супутниковими даними, тому для реального тематичного картографування та оцінювання змін, що відбуваються в природних гідрогеографічних ландшафтах на великих площах, альтернативи супутниковим даними поки що немає. Таким чином, розроблення методики супутникового моніторингу торфовищ з метою визначення їх пожежонебезпечного стану та прогнозування ризиків виникнення пожеж на заторфованих заплавах є дуже актуальною.

Особливістю торф'яних пожеж є те, що вони розгораються і розповсюджуються повільніше ніж лісові, але можуть тривати довго і переходити у прихований стан (жевріють на глибині, під поверхнею). Внаслідок цього підземні пожежі на торфовищах важко ідентифікуються, а з поверхні території торфовищ і згарищ можуть здаватися досить безпечними, навіть після гасіння основної пожежі. Разом з тим, завдяки підземним осередкам горіння торфу, залишаються ризики повторного загоряння торфовищ, що на більш пізніх стадіях їх гасіння буде потребувати великих зусиль і коштів. Для виявлення прихованих осередків підземного горіння торфу запропоновано вести супутниковий і наземний моніторинг торфовищ у тепловому діапазоні. (Пазинич та ін., 2016). Для прогнозу виникнення ризиків пожеж на торфовищах

пропонується комплексний аналіз матеріалів теплових каналів Landsat і багатоспектральних даних Sentinel 2 з похідними зображеннями спектральних індексів. Таким чином, *головною метою цієї роботи* є розроблення методики оцінювання ризиків виникнення пожеж на торфовищах на основі аналізу багатоспектральних космічних даних.

Для досягнення головної мети досліджень необхідно розв'язати низку методичних завдань:

1. Розробити методико-технологічну схему виділення заторфованих долин за матеріалами супутникових зйомок.

2. Проаналізувати комбінації спектральних образів торфовищ і обрати найбільш об'єктивні та оптимальні композити, що ідентифікують як, власне, осередки пожеж, так і згарища.

3. Проаналізувати відомі і запропонувати модифіковані розрахунки температури і вологості поверхні торфовищ. Визначити критичні значення цих показників для загоряння торфу.

4. Розробити критерії оцінювання рівня ризику виникнення пожеж на торфовищах.

5. Розробити методико-технологічну схему (комплекс) використання супутникових даних при визначенні ризиків виникнення пожеж на торфовищах.

6. Апробувати методики на тестових ділянках.

7. Розробити рекомендації щодо запобігання виникнення ризиків надзвичайних ситуацій, пов'язаних з горінням торфовищ.

Матеріали і методи дослідження

Як первинні матеріали використовувались відкриті супутникові дані, отримані з архівів Геологічної служби США (USGS) – Landsat, SRTM та Європейського космічного агентства (ESA) – Sentinel 2. Для аналізу площ торфовищ, що мають ризики загоряння, в межах заплавлів, застосовувалися багатоспектральні супутникові дані серії Landsat 4-8 з розрахунками відтвореної температури земної поверхні у тепловому діапазоні. Перевагою даних Landsat є довготривалий ряд спостережень і можливість ретроспективного аналізу пожежної ситуації. Нажаль, періодичність знімання (16 діб) невисока, і не завжди погодні умови дають змогу проаналізувати репрезентативний ряд знімків. Для визначення ризику настання пожежі та її поширюваності на більш детальному і короткочасному рівні, а також для визначення загроз втрати природних біоценозів пропонується використання часових рядів даних Sentinel-2. Ці дані необхідні для обчислення додаткових допоміжних індексів, які характеризують біофізичні параметри екосистеми торфовища – вологість, сухість, вегетацію, проективне покриття рослинності, кількість води в листовій поверхні, випаровування тощо. До недоліків матеріалів, отриманих із супутників Sentinel-2, слід віднести відсутність зйомки у тепловому діапазоні, що компенсувалось спільним аналізом з даними супутників Landsat 8. Разом з тим висока періодичність (доба) і просторова розрізненість (10 м проти 30 м) дають змогу вести

оперативний моніторинг торфовищ практично у реальному часі і на детальному рівні.

Головні методи досліджень – цифрова обробка матеріалів космічних зйомок в інтерактивному режимі у вільно поширюваних програмних комплексах: SNUP і QGIS та Scilab.

Результати досліджень – методичний аспект

Для розроблення методичних прийомів оцінювання ризиків виникнення пожеж на торфовищах, на основі аналізу багатоспектральних космічних даних, потрібний певний набір інформації про:

- місцезнаходження торфовища, картографічна прив'язка, просторове поширення відкладів торфу;
- потужність торф'яних відкладів;
- стан вологості торфовища;
- температура поверхні торфовища;
- погодні показники за останні місяці та синоптичний прогноз.

Для картографування торфовищ запропонована *методико-технологічна схема виділення заторфованих долин за матеріалами супутникових зйомок, яка включає:*

1) попередній аналіз і картографування торфовищ за даними геологічної зйомки (четвертинні відклади) на основі фондових матеріалів, визначення середньої потужності торф'яних відкладів;

2) побудову та аналіз цифрової моделі місцевості (рельєфу) з виділенням заплав чи понижень рельєфу;

3) дешифрування матеріалів багатоспектральної космічної зйомки (бажано з ІЧ діапазоном) високого просторового розрізнення (10–30 м).

При цьому для більш коректного і точного виділення контурів торфовищ проводиться або керована класифікація, або інтерактивне дешифрування знімків. Важливо в такому разі використовувати ряд з декількох (3–4) знімків, отриманих в різні сезони, та застосовувати різні варіанти синтезу, щоб виключити вплив рослинності та ступінь зволоженості. Оскільки торфовище може мати різноманітний дистанційний образ (розоране, обводнене, торф вибраний або вигорілий), то дані потрібно комплексувати з наземними та аеровізуальними (можливо з БпЛІА) спостереженнями для отримання більш достовірних меж поширення торфу. На всю іншу територію накладається маска, і проводиться аналіз виключно заторфованих ділянок або заторфованих заплав, що можуть займатися (Lischenko et al., 2019).

Аналіз комбінацій спектральних образів торфовищ і вибір оптимальних композитів, що ідентифікують осередки пожеж і згарщища

Незважаючи на те, що виникненню 80–90 % усіх торф'яних пожеж сприяє людський фактор (необережне поводження з вогнем, підпали сухостою тощо) решта 10–15 % пожеж можуть виникати від блискавок, проїжджаючого транспорту та самозаймання торфу, причиною якого є екзотермічні теплові, хімічні та мікробіологічні процеси. При цьому передумовами виникнення пожеж на

торфовищах є тривале підвищення температури та значне зменшення вологості (нижче 73 %) у торф'яних відкладах за певний період та достатня їх потужність для тління. У більшості заторфованих заплав малих річок, що оточують Київ (Ірпінь, Здвиж, Тетерів, Остер, Трубіж та їх притоки), та в заболочених притерасних частинах заплав Десни і Дніпра потужність відкладів торфу місцями становить 6–7 метрів, а поверхнева температура сягає критичних 42–45 °С. Все це є сприятливими умовами для виникнення пожеж. Показники вологості і температури поверхні можна отримати, використовуючи багатоспектральні космічні дані різного просторового розрізнення. Так, на регіональному рівні супутник TERRA з апаратурою MODIS, показує зміни температури поверхні в просторі. Дані готового продукту MOD14A2 фіксують як одномоментні, так і сумарні перевищення наземної температури за 8 днів спостережень, тобто “гарячі точки”. Теплове поле поверхні поділяється на 7 класів, три з яких відносяться до аномальних перевищень температур і з різною достовірністю ідентифікують пожежі. Для більш достовірного визначення місця та обставин пожежі застосовується КЗ серії Landsat, а саме два теплових канали (TIR) з діапазонами 10,8 та 12,0 мкм.

Моніторинг пожежонебезпечності торфовищ полягає в ідентифікації наявних місць горіння та прогнозуванні майбутніх. Перше завдання є відносно нескладним і його вирішення можливе шляхом елементарного візуального аналізу супутникових знімків середнього розрізнення (Landsat та/або Sentinel). Найкраще для цього підходить синтез каналів в діапазонах SWIR2, SWIR1 та RED: 7, 6, 4 та 12, 11, 8 для сенсорів OLI (Landsat 8) та MSI (Sentinel 2) відповідно. Гарячі точки при цьому будуть забарвлені світло-жовтим, оранжевим та червоним кольорами, а шлейф диму – світло-синім. Досить чітко виділяються вигорілі ділянки забарвлені в чорний чи темно-синій колір, що сильно контрастує на фоні зеленої рослинності (Рис. 1).

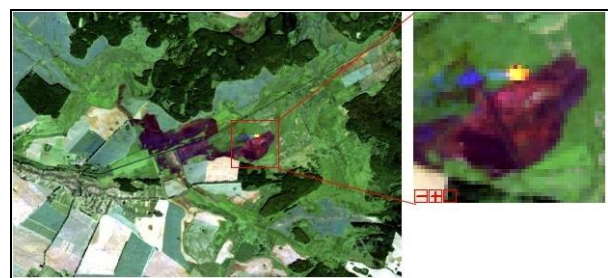


Рис. 1. Горіння торфовищ на ділянці Данівка 15 жовтня 2015 р. Синтез каналів 7, 6 і 4, Landsat 8

Оцінювання ризиків виникнення пожеж на торфовищах та їх прогнозування є багатоетапним процесом, який вимагає цифрової обробки даних супутникової зйомки та аналізу додаткових джерел, зокрема, метеорологічних даних, геологічної інформації тощо. Основними передумовами загоряння торфу є низька вологість та висока температура, що може бути спричинено різними

чинниками. Тому при супутниковому моніторингу торфовищ у першу чергу розраховуються і аналізуються саме ці показники.

Розрахунки температури поверхні та індексних показників за спектральними каналами багатоспектральних космічних даних

Попіксельний розрахунок температури земної поверхні (T) через спектральну щільність енергетичної яскравості здійснюється за оберненою формулою Планка (Станкевич та ін., 2015):

$$T = \frac{c_2}{\lambda \ln \left(\frac{\varepsilon \cdot c_1}{\lambda^5 \cdot L_s} + 1 \right)}, \quad (1)$$

де $c_1 = 1.191 \cdot 10^{-16}$ Вт на m^2 , $c_2 = 1.439 \cdot 10^{-2}$ м, ε – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання, λ – довжина хвилі електромагнітного випромінювання, L_s – спектральна щільність енергетичної яскравості земної поверхні.

Коефіцієнт теплового випромінювання визначається шляхом обрахунку індексу нормалізованої вегетаційної різниці (NDVI) та проєктивного покриття рослинності, а спектральна щільність енергетичної яскравості – шляхом перерахунку даних зйомки у довгохвильовому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. Для підвищення просторового розрізнення результуючого зображення розподілу температур земної поверхні комплексуються дані зйомки з різних супутників (видимого і ближнього ІЧ діапазону з одного і довгохвильового – з іншого), при цьому вони мають бути отримані в тих же погодних умовах і в невеликий проміжок часу. Просторове розрізнення вихідного растру буде таким самим, як у вхідного з високим розрізненням. Приміром, якщо використовувати дані Landsat та Sentinel, то розрізнення зображення поверхневого розподілу термодинамічної температури становитиме 10 м. Такі зображення можуть використовуватися для додаткового візуального аналізу областей інтересу і не використовуються при побудові часових рядів дистанційних даних.

Зволоженість досліджених ділянок аналізується опосередковано використанням ряду спектральних індексів: нормалізованого диференційного водного індексу (NDWI), нормалізованого диференційного снігового індексу (NDSI) та нормалізованого ґрунтового індексу (SAVI).

Індекс NDWI має дві варіації: перша запропонована Гао (Gao, 1996) – це якісні показники вмісту води в листках рослин, друга запропонована МакФітерс (McFeeters, 1996) і відображує кількість води у водних об'єктах.

Автори використовували обидва варіанти. Перший є співвідношенням відбиття в різних ділянках інфрачервоного діапазону спектра:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}. \quad (2)$$

Другий варіант є співвідношенням відбиття електромагнітного випромінювання в зеленому та ближньому інфрачервоному діапазонах:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}. \quad (3)$$

Нормалізований сніговий індекс обчислюється за формулою:

$$NDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}. \quad (4)$$

Скорегований індекс рослинності з поправкою на ґрунт (SAVI), отриманий для Landsat, використовується для корегування вегетаційного індексу NDVI на вплив яскравості ґрунту в місцях з незначним рослинним покривом. SAVI розраховується як відношення між значеннями R та NIR з поправочним коефіцієнтом яскравості ґрунту (L), що дорівнює 0.5 для більшості ґрунтів, і розраховується так:

$$((NIR - R) / (NIR + R + L)) * (1 + L), \quad (5)$$

для Landsat 4-7, SAVI = ((Band 4 – Band 3) / (Band 4 + Band 3 + 0.5)) * (1.5);

для Landsat 8, SAVI = ((Band 5 – Band 4) / (Band 5 + Band 4 + 0.5)) * (1.5).

З практичного погляду, як готовий продукт Landsat, він краще себе проявив для визначення вологих і сухих ділянок на заторфованій заплаві.

Ще одним опосередкованим методом визначення вологості є *аналіз показників евапотранспірації*, оскільки найінтенсивніше вода випаровується саме з відкритих водних об'єктів і залежно від зміни ступеня зволоження при однакових погодних умовах змінюється кількість вологи, що випаровується. Окрім цього випаровування є також важливою термодинамічною характеристикою, яку варто враховувати при прогнозуванні пожежонебезпечності. При переході води з рідкого стану в газоподібний для подолання сил тяжіння між молекулами використовується теплова енергія, яка поглинається з повітря, охолоджуючи його. Повітря, у свою чергу, охолоджуючись поглинає більше тепла з поверхні землі, сповільнюючи швидкість прогрівання торфу до критичних температур.

Розрахунок значень евапотранспірації проводиться за алгоритмом (*The Surface Energy Balance Algorithm for Land*) в основу якого покладене рівняння Пенмана-Монтейна:

$$ET_0 = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho * C_p * (\delta e) * g_a}{\left(\Delta + \gamma \left(1 + \frac{g_a}{g_s} \right) \right) + L_v}, \quad (6)$$

де L_v – об'ємна прихована теплота випаровування (2453 МДж/м^3), ET_0 – об'єм води, що випаровується (мм/с), Δ – швидкість зміни питомої вологості залежно від температури повітря (Па К^{-1}), R_n – радіаційний баланс (Вт/м^2), G – потік тепла в землю (Вт/м^2), C_p – питома теплоємність повітря (1004 Дж/кг/К), ρ – густина сухого повітря (кг/м^3), δe – дефіцит тиску пари (Па), g_a – атмосферна провідність (м/с), g_s – провідність поверхні (м/с), γ – психрометрична стала ($\approx 0.066 \text{ кПа/}^\circ\text{C}$).

Слід зазначити, що розрахунок показників випаровування вимагає не лише наявності даних космічної зйомки, а й даних наземних метеорологічних вимірювань та географічного положення метеостанції, що проводила такі вимірювання.

Методика оцінювання ризиків

При створенні моделі для розрахунку оцінювання ризиків пожежонебезпечності враховуються такі показники:

1) вологість торфу – вважається, що загоряння можливе при вологості до 73 %, а якщо вологість лише 40 % – торф стає легкозаймистим;

2) температура поверхні на торфовищі в середньому дорівнює температурі навколишніх мінеральних земель, якщо вища, то фіксується перегрів. Додатково враховується температура повітря на день зйомки за даними метеозведень;

3) потужність відкладів торфу, що впливає на тривалість і частоту загоряння;

4) періоди найбільших ризиків: тривалий теплий та посушливий період у березні, квітні (коли випадають трави і ще вегетація незначна), у серпні, вересні і жовтні – недостатньо вологи, вегетація зменшується. Про такі ситуації населення інформує служба з надзвичайних ситуацій та синоптики;

5) людський фактор – використання торф'яних ґрунтів та віддаленість від населених пунктів.

Для оцінювання ризиків виникнення пожеж на торфовищах пропонується поділяти кожен з п'яти критеріїв за рівнем ризику на 4 градації (відповідно оцінювати від 1 до 4 балів кожен) (Табл. 1).

Таблиця 1. Рівень ризику виникнення пожеж на торфовищах

Бал	Рівень ризику	Критерії				
		Вологість ґрунту, %	Температура поверхні, °С	Потужність відкладів торфу, м	Сезон / місяць	Антропогенний фактор та частота загоряння
		1	2	3	4	5
1	незначний	< 80	< 30	< 0,5	Зимовий / березень, листопад	відсутній
2	помірно небезпечний	60–80	30–40	0,5–1,5	квітень, жовтень	частково задіяний
3	небезпечний	40–60	40–50	1,5–4,0	Літній / травень, вересень	присутній
4	критичний	20–40	> 50	> 4,0	травень, вересень	значно впливає

Комбінація всіх критеріїв з урахуванням рівнів ризику кожного дає змогу оцінити загрозу ризику пожежонебезпечності торфовища, що може бути подано у балах від 1 до 20 та може поділятися на 4 рівні – критичний (15–20 балів) високий (10–15 балів), низький (5–10 балів) та незначний (менше за 5 балів).

Результати досліджень – практичний аспект

Для детального вивчення і апробації методичних напрацювань вибрані дві ділянки з поширенням торфовищ в межах лісової зони Полісся, на яких не одноразово виникали пожежі. Вони розташовані в районі смт. Бородянка (Київська область) на заплаві р. Здвиж та с. Данівка (меліоративна система Трубіж, Чернігівська область).

Тестова ділянка Бородянка. Велика кількість пожеж реєструється в долині р. Здвиж, яка є

заторфованою майже вздовж всієї течії та в більшості випадків меліорованою (Рис. 2).



Рис. 2. Заторфована заплава р. Здвиж біля смт. Бородянка (фото Філіповича, 2020)

Потужність торфових відкладів коливається від 1 до 8 м, але вона значно змінювалася впродовж тривалого часу за рахунок торфовидобування, розорювання і вигорання на окремих ділянках. Найбільш низька частина заплави заболочена і тут тривають процеси накопичення торфу.

Оконтурювання меж заплави Здвижу та його приток, які за даними геологічної зйомки позначені заторфованими, відбувалося за цифровими картами місцевості (побудованими за супутниковими даними SRTM Plus v.3 і деталізованими за даними ASTER GDEM v.2). Додатково контури меж торфовищ уточнювалися за різносезонними знімками Sentinel-2 для виключення похибок, пов'язаних з рослинністю і шорсткістю поверхні. На Рис. 3 показана процедура виділення контуру заплави.

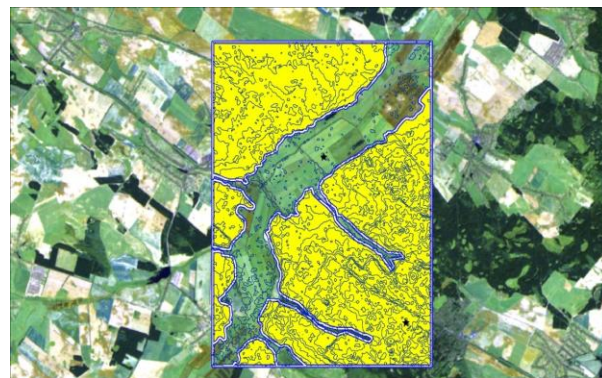


Рис. 3. Виділення контурів заторфованої заплави р. Здвиж та приток за космічними даними Sentinel та SRTM

Аналіз поширення пожеж за останні роки на торфовищах в долині р. Здвиж, в районі смт. Бородянка та селища Пилиповичі за КЗ Landsat дає змогу зробити висновки, що пожежі тут відбувалися часто, особливо восени в результаті підпалів у спекотні 2005, 2015, 2018, 2021 роки (Рис. 4).

Розрахунки поверхневих температур, що зображені на Рис. 5 за період 2016–2021 рр. показали, що у серпні–вересні (окрім червня 2021 р., який набагато тепліший, і заплава різко диференціюється на ділянки холодні і тепліші за рахунок сільгоспугідь і вологих трав'яних лук) суттєвих перепадів

температури не зафіксовано. Водний індекс відображає кількість води в рослинності і найбільші значення має в червні 2021 р., а в пізньолітній і ранньоосінній період залежить від температурного стану поверхні сільгоспугідь (Рис. 5) і вологості на поверхні (Рис. 6).

За даними LST проведено 2 профілі з показниками температури поверхні через тестову ділянку Бородянка станом на вересень 2017, 2018 і 2021 років (Рис. 7). Окремі ареали суттєво підвищених температур у заплаві р. Здвиж зафіксовані 21 вересня 2018 р. на півночі (показано на профілі А – Рис. 8) та на притерасній частині на півдні тестової ділянки (профілі В – Рис. 9), що зіставляється з підвищеною сухою ділянкою, це підтверджує і розрахований водний індекс.

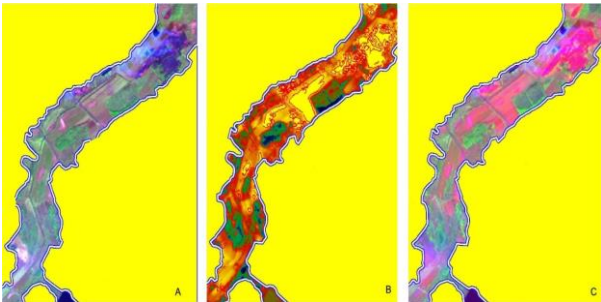


Рис. 4. Пожежа 15 жовтня 2015 р. біля смт. Бородянка. А – композит каналів 10, 5, 3 Landsat-8, В – температура поверхні розрахована, С – ґрунтовий індекс SAVI

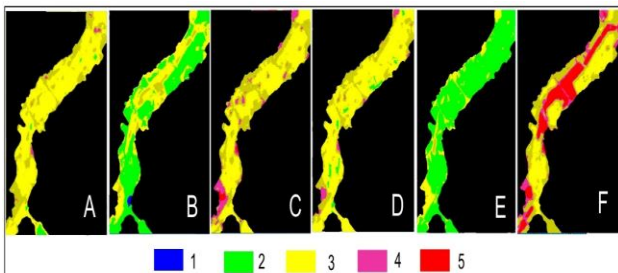


Рис. 5. Температура поверхні за K3 Landsat: А – 21.08.2016; В – 18.09.2017; С – 11.08.2018; D – 30.08.2019; Е – 10.09.2020; F – 21.06.2021.

Умовні позначення: показник LST 1 – 0–15°C; 2 – 15–25°C; 3 – 25–30°C; 4 – 30–35°C; 5 – 35–43°C

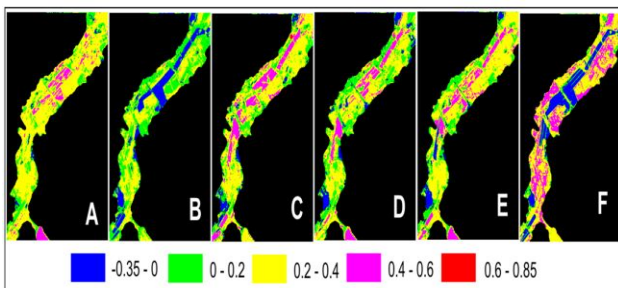


Рис. 6. Водний індекс NDWI vegetation за K3 Landsat: А – 21.08.2016; В – 18.09.2017; С – 11.08.2018; D – 30.08.2019; Е – 10.09.2020; F – 21.06.2021

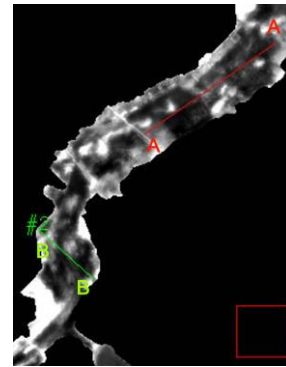


Рис. 7. Трасування профілів А та В через заплаву р. Здвиж. Тестова ділянка Бородянка

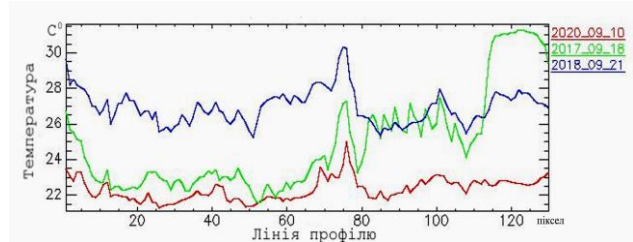


Рис. 8. Температурний профіль А (повздовжній) через заторфовану заплаву р. Здвиж

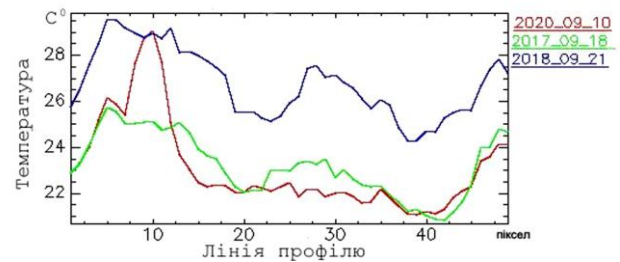


Рис. 9. Температурний профіль В (поперечний) через долину р. Здвиж

Тестова ділянка Данівка. Торфовище Трубіж є значним осередком пожежі в цьому регіоні і відрізняється великими площами займань. Воно знаходиться на схід від с. Данівка Козелецького району Чернігівської області. В 50-х роках минулого сторіччя проведена меліорація болота Трубіж, що значно понизило рівень ґрунтових вод. Русло р. Остер було спрямлене, що збільшило витрати води, частина води з болота була скинута в р. Трубіж. Внаслідок пересихання і зубожіння торфогрунтів почастишали пожежі, які стали довготривалими і охоплювали площі до 70 га. Через значну потужність торфових відкладів ця ділянка характеризується утворенням підземних залишкових осередків горіння (Рис. 10).



Рис. 10. Пожежа на торфовищі Данівка у жовтні–листопаді 2015 р. (фото Пазинич, 2015)

На тестовій ділянці в результаті комплексного аналізу SRTM з кроком горизонталей 1, 5 та 10 м, а також аналізу зображення серії різночасових і різносезонних Landsat, починаючи з 1986 року та Sentinel-2 з 2018 року, виділені контури торфовища (Рис. 11, 12).

Проведені розрахунки температури поверхні (LST), індексу NDWI та індексу NDWI vegetation в межах торфовища для всього періоду спостережень за 2015–2021 рр. Застосована відносна кольорова шкала показників для кожного зображення, що показані на Рис. 13. Для індексних показників та LST потрібно кількісне порівняння, тому на Рис. 14 показані температури поверхні за ті ж періоди, але вже в єдиній температурній шкалі. Оскільки зображення отримані в різні місяці і сезони, то температура різниться, але кольорами червоним і чорним показані перевищення, що сягали 40°.

Порівняння температури та значень різних індексів можна проводити по профілям-трансектам. На Рис. 15–17 показані приклади трасування двох профілів LST, на яких чітко спостерігаються ділянки підвищених і понижених температур поверхні за 2015, 2018 та 2021 роки.

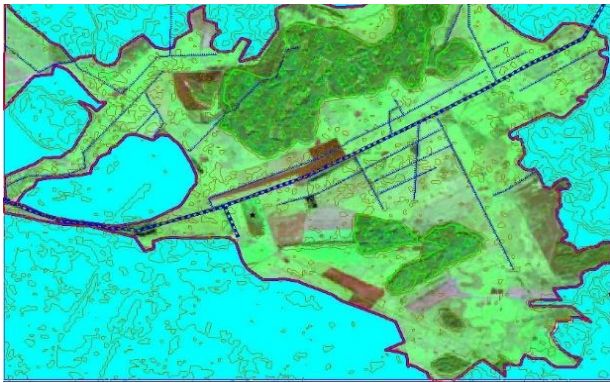


Рис. 11. Контури торфовища Трубіж

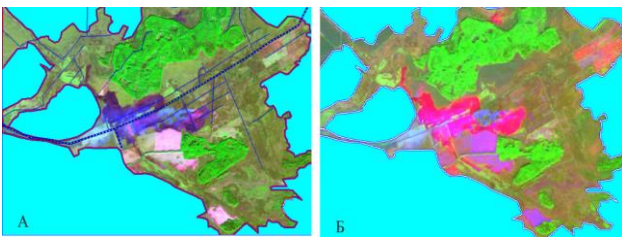


Рис. 12. Пожежа жовтня 2015 р. виявлена в TIR діапазоні (А) та на карті значень спектрального індексу SAVI (Б)

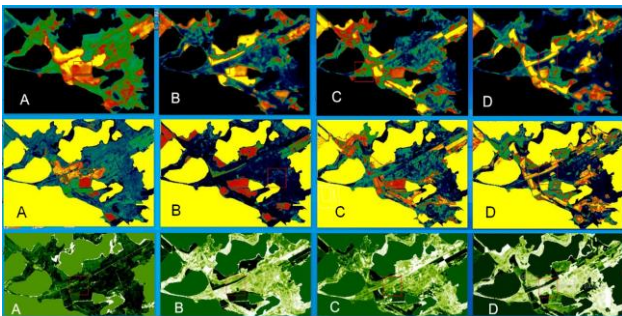


Рис. 13. Серія зображень торфовища Трубіж на K3 Landsat: А – 15.10.2015, В – 19.05.2019, С – 10.09.2020, Д – 25.06.2021. 1-й ряд – розрахунок температури поверхні (показник LST), 2-й ряд – індекс NDWI, 3-й ряд – індекс NDWI vegetation

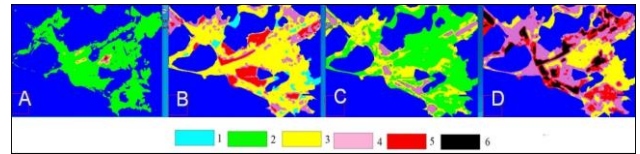


Рис. 14. Температура поверхні за K3 Landsat: А – 15.10.2015, В – 19.05.2019, С – 10.09.2020, Д – 25.06.2021. Умовні позначення: показник LST – 1 – 0–15°C; 2 – 15–25°C; 3 – 25–30°C; 4 – 30–35°C; 5 – 35–40°C; 6 – 40–50°C

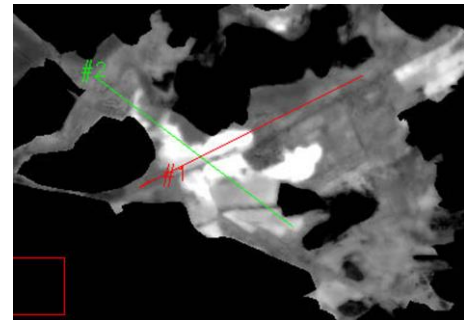


Рис. 15. Положення профілів на температурному полі (2015.10.25) торфовища Трубіж, тестова ділянка Данівка

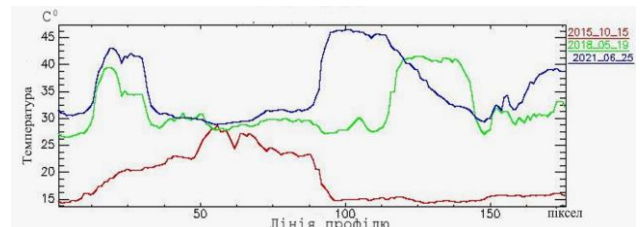


Рис. 16. Температурний профіль через торфовище Трубіж № 1 (повздовжній)

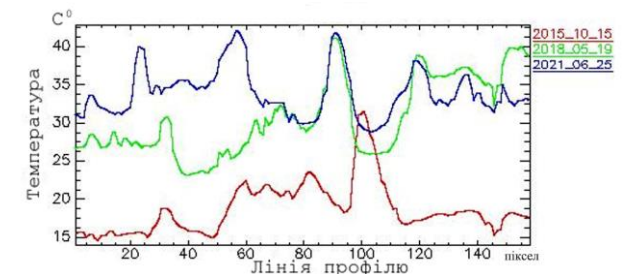


Рис. 17. Температурний профіль № 2 через торфовище Трубіж (поперечний)

З профілів видно, що місце пожежі у жовтні 2015 р., яке було на торфовищі, вже у 2018 та 2021 роках у літній період має низькі значення LST через обводнення цієї ділянки і тому ризик загоряння низький. Високі піки температури поверхні надалі характеризують розорані ділянки, які прогриваються більше за вологі, вони належать до високого ступеня ризику за рахунок потужності торфових відкладів. Станом на червень 2021 р. ділянок з критичним ступенем ризику не спостерігається.

За результатами досліджень для дистанційного оцінювання ризику виникнення пожеж на торфовищах пропонується методико-технологічний комплекс (схема) методів і прийомів обробки супутникової і апіорної геологічної інформації. Комплекс складається із декількох рівнів (Рис. 18):

I. Блоків отримання і обробки різнобічної інформації: формування бази даних, яка включає відібрані серії космічних зображень, геологічну інформацію для визначення місцезнаходження заторфованих ділянок; метеорологічні дані та дані ДСНС про наявні пожежі та пожежі, що вже сталися у минулому.

II. Блоків, що включають побудову цифрових моделей місцевості, картографування заправ рік і торфовищ (дешифрування КЗ і ЦММ); ретроспективний аналіз природного стану і використання території, контрольована класифікація, маскування.

III. Блоків вивчення фізичних характеристик торфовищ на основі аналізу дистанційної і традиційної інформації, розрахунки температур поверхні, вологості та індексів, виявлення потенційно пожежонебезпечних ділянок.

IV. Блоків моніторингу територій та оцінювання ризиків виникнення пожежонебезпечної ситуації (5 критеріїв за 4 рівнями ризику) та прогнозного оцінювання загроз створення пожежонебезпечної ситуації за 4 рівнями – критичним, високим, низьким і незначним. Розробка рекомендацій щодо запобігання виникнення ризиків надзвичайних ситуацій.

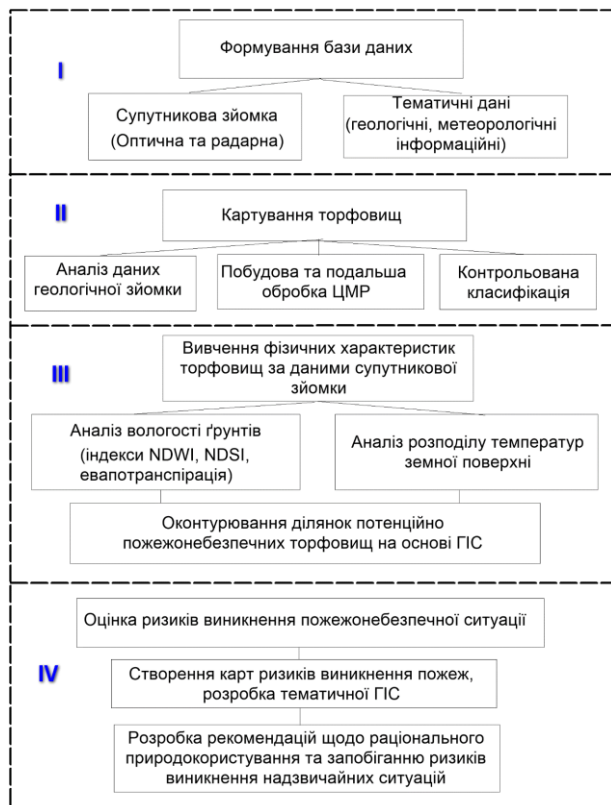


Рис. 18. Методико-технологічний комплекс (схема) використання супутникових даних при визначенні ризиків виникнення пожеж на торфовищах

Рекомендації щодо запобігання виникнення ризиків надзвичайних ситуацій

Запобігання ризикам виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з горінням торфовищ, вимагає

прийняття ряду законодавчих та управлінських рішень і таких рекомендацій:

Обводнення торфовищ є найефективнішим способом протидії виникненню пожеж, суть якого полягає у затримці дощових і талих вод шляхом створення дамб або перекачки води на торфовище, заторфовані заплави можуть бути штучно затоплені річковими водами. Обводнення торфовищ на сьогодні отримало значне поширення в розвинених країнах Європи, так, наприклад, у Нідерландах обводнено 80 %, а в Фінляндії – 100 % торфовищ.

Удосконалення законодавчих та нормативно-правових актів, що регулюють порядок рекультивации торфорозробок. Це стосується як удосконалення самого процесу рекультивации, так і посилення відповідальності за неякісно проведену рекультивацию.

Посилення відповідальності за підпал сухоюстю в межах територій залягання торфу та введення кримінальної відповідальності у випадку, якщо такий підпал призвів до виникнення надзвичайних ситуацій з катастрофічними наслідками. Цей пункт, зокрема, передбачає картування з виділенням меж усіх пожежонебезпечних ділянок з шаром торфу від півметра і більше з подальшим внесенням цих даних як окремого позначення на публічну кадастрову карту.

Проведення інформаційних заходів та роз'яснювальної роботи серед населення, встановлення банерів, попереджувальних табличок, випуск і поширення брошур, організація волонтерської діяльності для поширення інформації тощо.

Впровадження супутникового моніторингу територій залягання торфів територіальними органами ДСНС України, організація підготовки спеціалістів у галузі ГІС/ДЗЗ для вищезгаданих органів.

Налагодження співпраці між науковими установами та університетами з одного боку й органами ДСНС України з іншого.

Висновки

У результаті моніторингу стану заторфованих долин та пожеж, які там відбуваються, стає зрозумілим, що сухі і спекотні весняно-осінні періоди сприяють виникненню тривалих пожеж саме на меліорованих торфовищах, де торфові відклади мають достатні потужності та недостатнє зволоження.

Згідно з прогнозами, на території України варто очікувати зростання рівня пожежної небезпеки за рахунок підвищення температури повітря, зміщення сезонів, подовження тривалості пожежонебезпечного періоду, збільшення повторюваності та інтенсивності хвиль тепла і стихійних гідрометеорологічних явищ, змін у бік зменшення водних ресурсів місцевого стоку. Масова меліорація заторфованих заправ та їх використання під сільгоспугіддя і навіть забудову, сприяла частим загорянням торф'яної породи. Багатоспектральні супутникові дані високого просторового розрізнення дають змогу

безпосередньо виділити заболочені та заторфовані ділянки земної поверхні, вирахувати індекси вологості, посушливості та вегетації з метою диференціації ділянок торфовищ за ризиками пожежної небезпечності. Запропонований методико-технологічний комплекс дистанційних досліджень може успішно використовуватись для визначення ризиків пожежонебезпечності на торфовищах і дає змогу вести контроль за залишковими, прихованими під землею, осередками горіння торфу на вже знешкоджених ділянках. Стан торфовищ діагностується за критеріями ризиків і оцінюється за 4 ступенями ризику виникнення пожеж – критичним, високим, низьким і незначним.

Література

- Аналіз стану мінерально-сировинної бази України, облік родовищ і складання Державних балансів запасів торфу і сапропеліу станом на 01.01.2003–2005 рр. (2005). Київ: Державний інформаційний геологічний фонд України.
- Гаркавий, С. Ф. (2002). Повторне радіоактивне забруднення території внаслідок пожеж на торфовищах, забруднених радіонуклідами, Матеріали IV Міжнародної наук.-пр. конф. “Об’єкт “Укриття”. 15 років: минуле, сучасне, майбутнє”, 10, ч II, 72–76. Чорнобиль: НАН України. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/060/34060861.pdf.
- Ліщенко, Л. П., Пазинич, Н. В. (2016). Моніторинг стану торфовищ для виявлення пожежонебезпечних ділянок за допомогою дистанційних методів. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8, 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/72/89>.
- Пазинич, Н. В., Ліщенко, Л. П., Крилова, Г. Б., Філіпович, В. С., Лубський, М. С. (2016). Дослідження та моніторинг пожежонебезпечних торфовищ на основі матеріалів дистанційного зондування Землі. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*, 1(1), 85–91. URL: http://edu-mns.org.ua/nmc/538/Sbornik_2016_cor.pdf.
- Станкевич, С. А., Филиппович, В. Е., Лубский, Н. С., Крылова, А. Б., Крицук, С. Г., Бровкина, О. В. ... Тронин, А. А. (2015). Интеркалибрация методов восстановления термодинамической температуры поверхности урбанизированной территории по материалам тепловой космической съёмки. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 7, 14–23. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77>.
- Gao, B. (1996). NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3).
- Kong, S-R, Yamamoto, M, Shaari, H, Hayashi, R, Seki, Tahir, Fadzil M-F, Sulaiman, A. (2021). The significance of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Borneo peat core for the reconstruction of fire history. *PLoS ONE* 16 (9) : e0256853. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256853>.
- Lisichenko, L. P., Pazynych, N. V., Krylova, A. V. (2019) *Remote sensing of peatbogs regarding their fire hazard*, Матеріали V междунар. н.-пр. конф. Актуальные вопросы наук о земле в концепции устойчивого развития Беларуси и сопредельных государств (Гомель, 28–29.11.2019). кн. 1, 260–264. URL: <http://conference.gsu.by>.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Smith, T. E. L., Evers, S., Yule, C. M., & Gan J. Y. (2018). In situ tropical peatland fire emission factors and their variability, as determined by field measurements in Peninsula Malaysia. *Global Biogeochemical Cycles*, 32, 18–31. <https://doi.org/10.1002/2017GB005709>.
- Stockwell, C. E., Yokelson, R. J., Kreidenweis, S. M., Robinson, A. L., DeMott, P. J., Sullivan, R. C. ... Stevens, L. (2014). Trace gas emissions from combustion of peat, crop residue, biofuels, grasses, and other fuels: configuration and FTIR component of the fourth Fire Lab at Missoula Experiment (FLAME-4). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 9727–9754. <https://doi.org/10.5194/acp-14-9727-2014>.
- Аналіз стану мінерально-сировинної бази України, облік родовищ і складання Державних балансів запасів торфу і сапропеліу станом на 01.01.2003–2005 рр. (2005). Київ: Державні інформаційні геологічні фонди України. (In Ukrainian).
- Gao, B. (1996). NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58(3), 257–266. [https://doi.org/10.1016/s0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/s0034-4257(96)00067-3)
- Harkavyi, S. F (2002). *Povtorne radioaktivne zabrudnennia terytorii vnaslidok pozhezh na torfovishchakh, zabrudnennykh radionuklidamy, Scientific and technical collection Problems of Chernobyl*, 10, part II, 72–76. Chernobyl: NAN Ukrainy URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/34/060/34060861.pdf. (In Ukrainian).
- Kong, S-R, Yamamoto, M, Shaari, H, Hayashi, R, Seki, Tahir, Fadzil M-F, Sulaiman, A. (2021). The significance of pyrogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in Borneo peat core for the reconstruction of fire history. *PLoS ONE* 16 (9) : e0256853. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0256853>.
- Lisichenko, L. P., Pazynych, N. V. (2016). Monitoring of peat bogs areas to identify fire hazards by remote sensing. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8, 29–39. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/72>. (In Ukrainian).
- Lisichenko, L. P., Pazynych, N. V., Krylova, A. V. (2019). *Remote sensing of peatbogs regarding their fire hazard, Collection materials V International Conference Aktualnye voprosy nauk o zemle v kontseptsyyi ustoychivoho rozvytytia Belarusy y sopredelnykh hosudarstv (Homel, 28–29.11.2019)*, (1), 260–264. URL: <http://conference.gsu.by>.
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17:7, 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.
- Pazynych, N., Lisichenko, L., Krylova, A., Filipovych V., Lubsky M. (2016). Doslidzhennia ta monitorynh pozhezhonebezpechnykh torfovishch na osnovi materialiv dystantsiinoho zonduvannia Zemli. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(1), 88–94. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/sbcps_2016_1_15. (In Ukrainian).
- Smith, T. E. L., Evers, S., Yule, C. M., & Gan, J. Y. (2018). In situ tropical peatland fire emission factors and their variability, as determined by field measurements in Peninsula Malaysia. *Global Biogeochemical Cycles*, 32, 18–31. <https://doi.org/10.1002/2017GB005709>.
- Stankevych, S. A., Fylyppovych, V. E., Lubskiy, N. S., Krylova, A. B., Krytsuk, S. H., Brovkyna, O. V. ... Tronyn, A. A. (2015). Intercalibration of methods for the land surface thermodynamic temperature retrieving inside urban area by thermal infrared satellite imaging. *Ukrainian*

Journal of Remote Sensing, 7, 12–21. URL: <https://ujrs.org.ua/ujrs/article/view/59/77>. (in Russian).
Stockwell, C. E., Yokelson, R. J., Kreidenweis, S. M., Robinson, A. L., DeMott, P. J., Sullivan, R. C. ... Stevens, L. (2014). Trace gas emissions from combustion

of peat, crop residue, biofuels, grasses, and other fuels: configuration and FTIR component of the fourth Fire Lab at Missoula Experiment (FLAME-4). *Atmospheric Chemistry and Physics*. 14. 9727–9754. <https://doi.org/10.5194/acp-14-9727-2014>.

THE TECHNIQUE FOR SATELLITE MONITORING OF PEATLANDS IN ORDER TO DETERMINATE THEIR FIRE HAZARD AND COMBUSTION RISKS

L. P. Lischenko, R. M. Shevchuk, V. Ye. Filipovych

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Science of the National Academy of Sciences of Ukraine, 55-B, Oles Gonchar str., Kyiv 01054, Ukraine

Prolonged dry periods in spring and autumn, which are becoming more frequent for the Ukrainian Polissya, contribute to fires, especially in peatlands, that are dangerous for human health and ecosystems in general. Forecasting the risk of such natural and anthropogenic emergencies requires monitoring of current situations. Satellite monitoring provides an accurate information of the disaster and allows to realistically estimate the amount of damage. The article investigates the factors to be taken into account in peatlands monitoring and considers methods of processing of multispectral satellite data (Landsat, Sentinel series) in combination with traditional statistics data and field measurements. The technological diagram for making the studies is proposed. To assess the risks, the values that can be obtained simultaneously with the help of satellite data on large areas are determined: peat soil moisture, peat surface temperature, spectral indices (water, soil), evapotranspiration; the seasons of the greatest risks of fires are defined, and also risks associated with anthropogenic impact (proximity to settlements, agricultural trials, hayfields, careless handling of fire and arson). The condition of peatlands is diagnosed according to the developed criteria and assessed by four levels of fire risk - critical, high, low and insignificant. The study of spectral indices showed that with the help of the SAVI soil index in combination with the analysis of surface temperature, the burned areas and fires are accurately mapped in real-time. To predict the occurrence of fire situations, the use of two variants of the normalized differential water index (NDWI) in combination with thermal imaging is proposed. The test sites provide examples of diagnosing fires and burned areas in peatlands, as well as examples of forecasting fire hazards situations that require close attention of local authorities. Recommendations are given to prevent emergencies related to the burning of peatlands.

Keywords: peat deposits, multispectral satellite imagery, long-wave infrared range, spectral indices, fire hazard, fire safety.

Рукопис статті отримано 31.01.2022