

<https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>  
УДК 528.8.04:551.4

## Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі

**В.І. Лялько, С.С. Дугін\*, О.М. Сибірцева, Є.М. Дорофей, С.І. Голубов, Т.А. Орленко**

ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ, Україна  
E-mail: Dstas2389333d@i.ua

\*Автор для кореспонденції

### On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data

**V.I. Lyalko, S.S. Dugin\*, O.M. Sybirtseva, Ye.M. Dorofey, S.I. Golubov, T.A. Orlenko**

State institution "Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth on the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine

E-mail: Dstas2389333d@i.ua

\*Corresponding author

*Considering the useful properties of peat as an alternative fuel source, a study of the properties of the vegetation and water indices of the red edge, as well as water indices calculated on the basis of spectrometry of ground vegetation cover over peatlands, was conducted. The study was carried out in the Shatsk National Natural Park and at the Bortnychi Aeration Station near the Dnieper River. Experiments in Shatsk National Park were conducted in 2010 using the ASD Field Spec 3FR spectroradiometer with the application of Sentinel-2 satellite images acquired in 2019 and 2021. The vegetation consisted mainly of sedge (*Carex riparia*), with confirmation of the presence of peat in this area. The experiments were also conducted at the Bortnychi Aeration Station on the left bank of the Dnieper.*

*The vegetation indices such as REP, TCI, and NDVI705 were studied to classify the land cover using the satellite images data. In addition, other vegetation indices were used, such as NDVI, EVI, SIPI, as well as indices indicating moisture and plant photosynthesis. The NDVI and EVI indices provided valuable results for the identification of peatlands. Modified chlorophyll index CLm is calculated for the red edge of the spectrum, similarly to NDVI and EVI. The average value of the REP for the test points in both areas was similar and indicates the possible presence of peatland. The data analysis also confirmed the identity of peatland features in both areas. The high correlation of indices between these territories confirms this identity. Thus, vegetation indices can be used to determine the boundaries of peatlands and identify *Carex riparia*, which is one of the indicators of peatlands.*

**Keywords:** peat; remote sensing of the Earth; satellite images; spectral indices.

Цитування: [Лялько В.І., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Дорофей Є.М., Голубов С.І., Орленко Т.А. Про можливості визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі. *Геологічний журнал*. 2023. № 4 (385). С. 61–78. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>

Citation: [Lyalko V.I., Dugin S.S., Sybirtseva O.M., Dorofey Ye.M., Golubov S.I., Orlenko T.A. 2023. On the possibility of identifying peatland features using remote sensing data. *Geologičnij žurnal*, 4 (385): 61–78. <https://doi.org/10.30836/igs.1025-6814.2023.4.288929>

© Видавець Інститут геологічних наук НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

© Publisher Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## 1 Вступ

Торф серед природних ресурсів посідає особливе місце. Торф – це геологічно наймолодша ланка в ланцюгу каустобіолітів «торф – буре вугілля – кам'яне вугілля – антрацит». Торф – це осадова нещільна гірська порода, що утворюється у процесі природного відмирання та неповного розпаду болотяних рослин. У ґрунті ці рослини не розкладаються та накопичуються щороку. Поверхнєве розташування торфових родовищ та порівняно невеликі витрати на організацію і ведення видобувних робіт роблять цю корисну копалину потенційно ефективним видом палива. На сьогодні доцільність видобування торфу зростає, оскільки більшість запасів кам'яного вугілля зосереджені в східній частині України, тимчасово окупованій. Зараз Україна перебуває в стані війни. Частина теплогенеруючих потужностей та джерел енергоносіїв пошкоджено і зруйновано. Накладено також ембарго на постачання природного газу та вугілля з Росії. Країни ЄС теж відмовляються від постачання природного газу та вугілля з Росії, і тому забезпечення енергетичної незалежності України досить актуальне (Снежкін, Корінчук, 2022).

Торф – це надійна альтернатива традиційним паливним ресурсам. Торфові ресурси України становлять 2,17 млрд т, балансові запаси – 934 млн т, що робить торф реальним резервом покращення паливно-енергетичного балансу України (Зацерковний, Оберемок, 2017). Середньорічний видобуток торфу в нашій країні становить приблизно 500 тис. т/рік, що значно менше реальних можливостей. Так, ще в середині ХХ ст. на території України торфудобували 3–4 млн т/рік. Науковці Інституту геологічних наук НАН України, Академії технічних наук України та Співки буровиків України дослідили стан та перспективи освоєння торф'яного потенціалу країни. Якщо розпочати зараз освоювати торф'яний потенціал країни, то можна скоротити споживання природного газу приблизно на 1 млрд м<sup>3</sup>. А щорічний видобуток торфу можна збільшити на 1 млн т (Вдовиченко, 2023). Якщо розглядати Київщину, то торфовища тут розміщені в Обухівському, Вишгородському, Бучанському районах, біля населених пунктів Романків, Феневичі, Соснівка, Стоянка, Шибене, Здвижівка. Також торфовища є поблизу Димера, Бучі, Боярки, Василькова, Березані, Мокреця, Броварів.

Торф – це не тільки енергетична сировина, а також джерело добрив, поживних сумішей для городництва, ґрунтів сільськогосподарського призначення, субстратів для газонів, біостимуляторів для росту рослин і тварин. З торфу також виробляють етиловий спирт, гумінові кислоти, фурфурол, віск, кормові дріжджі тощо. Але на сьогодні функціонування торфових родовищ не контролюється. На торфовищах відбувається несанкціоноване добування сировини. Влітку часто спостерігається самозагоряння торфових полів, на гасіння яких витрачається багато коштів і ресурсів. Тобто торфовища потребують постійного моніторингу.

Засобами дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) можна успішно здійснювати не тільки такий моніторинг, але і розширювати розвідку цієї корисної копалини. ДЗЗ слугує зручним інструментом для отримання характеристик торфовищ та їх моніторингу у довгостроковій перспективі, на регіональному та глобальному рівнях. Торфовища – це складні комплексні ландшафтно-геохімічні бар'єри. Вони об'єднують біогеохімічні, сорбційні, кислі, відновлювальні, а також механічні бар'єри лінійного та площинного характеру. Торфовища мають особливу здатність у час опадів вбирати воду, немов губка. Натомість в посуху накопичену воду поступово віддають. Торфовище – це наземна водно-болотна екосистема, в якій виробництво органічної речовини перевищує її розкладання. Отже, відбувається чисте накопичення торфу. У прохолодному кліматі рослинність торфовищ переважно складається зі сфагнових мохів, осоки та чагарників і є основним утворювачем торфу, тоді як у теплішому кліматі злакові та деревна рослинність забезпечують більшу частину органічної речовини. Звичайно, що характеристики спектрального відбиття торфовищ відрізняються від таких лісових, сільськогосподарських і пасовищних екосистем за гідрологічними умовами, вмістом води та пов'язаними з ними рослинними угрупованнями. Екосистеми торфовищ належать до водно-болотних угідь і є частиною гідрологічної мережі, яка пов'яже потоки, річки, озера, рівень і якість води.

За об'єкти досліджень ми вибрали торфовища Полісся та Київщини. Мета цих досліджень – підвищити ефективність пошуку покладів корисних копалин на основі розробки

нових технологій з використанням матеріалів дистанційних зйомок. В останні кілька десятиліть у завданнях пошуку покладів корисних копалин (торфу) все більшу роль відіграють методи ДЗЗ. Практика показує, що дистанційні методи знаходять успішне застосування як на регіональному, так і локальному рівнях, особливо в умовах, при яких території дослідження мають досить великі площі та прямий доступ до них ускладнений (Багатоспектральні... , 2006). Застосування методу дистанційного пошуку торфовищ з використанням матеріалів ДЗЗ, що ґрунтується на феномені впливу наявного на деякій глибині покладу торфовища на геохімічні та біофізичні параметри, розглянуто в цій статті. Суть у тому, що в умовах досить однорідної за структурою і складом ґрунтів та рослинності ділянки земної поверхні зазвичай не сильно відрізняються за спектральними відбивними властивостями, однак присутність у надрах покладу торфу веде до зміни спектральних портретів відповідних земних покривів. Ці зміни (якщо вони досягають певного рівня) розглядаються як аномалії спектрального відображення земної поверхні і є одним з важливих індикаторів (Попов, 2018).

Аномалії спектрального відбиття рослинного покриву на земній поверхні над покладами описані у монографії (Багатоспектральні..., 2006). Однак виявлення аномалій за матеріалами зйомки – це лише частина загального процесу вивчення досліджуваної ділянки земної поверхні, бо при прийнятті рішення про наявність покладу важливе значення мають геологічні дані, результати польових спектрометричних вимірів та аналіз всієї зібраної інформації, що дозволяє підвищити достовірність пошуково-прогнозних оцінок і розширити коло вирішуваних завдань.

Свого часу в ДУ «Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» проводилися дослідження особливостей спектрів відбиття, отриманих за даними польового спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR над торфовищами в межах території досліджень Шацького полігона ДЗЗ у рамках міжнародної програми GEOSS/GMES (Earth..., 2012). Зазначені польові дослідження здійснювались як полігонні під космознімання для українського супутника «Січ-2». Цей

супутник був запущений в грудні 2011 р. і пропрацював лише 1 рік. Зараз можливості в сфері дистанційного зондування значно розширилися (Nebesny, 2020). Постійний розвиток технологій дистанційного зондування покращив сучасні супутникові системи ДЗЗ, наприклад супутники Sentinel-2A і Sentinel-2B були запущені в 2015 і 2017 рр. у рамках програми Copernicus Європейського космічного агентства. Сенсори на борту цих супутників – це багатоспектральні інструменти видимого, ближнього інфрачервоного та короткохвильового інфрачервоного (SWIR) діапазонів, призначені для безперервного спостереження Землі з високою просторовою розрізненістю (10, 20 і 60 м). Крім того, висока часова розрізненість – від десяти до п'яти днів, дозволяє здійснювати моніторинг короточасних змін. У відкритому доступі знаходяться космознімки Sentinel-2, які за своїми характеристиками підходять для наших спектрометричних досліджень. Багатоспектральний сенсор MSI супутника Sentinel-2 дозволяє отримувати спектри відбиття земних покривів. Рослинність має унікальний профіль відбиття на різних довжинах хвиль електромагнітного спектра. Наявність хлорофілу приводить до чітких особливостей спектрального відбиття, яке ми і використовуємо у наших дослідженнях зарослих торфовищ. Отримані спектральні сигнатури дають певне уявлення про характер земного покриву (ґрунти, рослинність, урбаністичні поверхні, вигорілі території, водні поверхні, торфовища тощо). Часто доводиться поєднувати конкретні спектральні діапазони, які становлять інтерес для вивчення певного явища. Комбінації спектральних діапазонів, що називаються спектральними індексами, надають стислу інформацію про конкретні підсистеми, матеріали або процеси (Nebesny et al., 2020). Супутники Sentinel-2 дозволяють отримувати широкодіапазонні багатоспектральні зображення з високою просторовою розрізненістю за допомогою сенсора MSI у 13 спектральних діапазонах: чотири діапазони (B2, B3, B4 – видимого діапазону, B8 – ближнього інфрачервоного діапазону) мають просторову розрізненість 10 м; шість діапазонів (B5, B6, B7 – червоного краю ближнього інфрачервоного діапазону, B8a – ближнього інфрачервоного діапазону, B11, B12 – короткохвильового

інфрачервоного діапазону) – 20 м; три діапазони (В1 – видимого діапазону, В9 – ближнього інфрачервоного діапазону, В10 – короткохвильового інфрачервоного діапазону) – 60 м. Зазначені спектральні діапазони дозволяють отримати інформацію про стан земельних та водних покривів на момент зйомки.

Важливим елементом супутникових систем моніторингу є наявність наземної спектральної інформації про стан земних покривів, зокрема про стан рослинності, що дозволяє проводити точну верифікацію результатів супутникових зйомок. Знання про зв'язок стану рослинності з її спектральними відбивальними характеристиками лежать в основі вирішення тематичних завдань, у нашому випадку – ідентифікації торфовищ. Зараз у практиці супутникового моніторингу земної поверхні спостерігається дедалі активніше використання методів і засобів прецизійного наземного спектрометрування. На відміну від багатоспектральної зйомки, що вибірково реєструє окремі області спектра, прецизійні спектрометри реєструють більш повну, суцільну спектральну сигнатуру оптичного випромінювання, що знімається у вигляді сукупності досить вузьких спектральних каналів, які перекривають весь спектральний діапазон, що реєструється сенсором. У нашому випадку мова йде про польовий спекторадіометр ASD FieldSpec 3FR, яким ми проводили зйомку торфовищ. Робочий спектральний діапазон цього приладу становить 350–2500 нм. Висота вимірювання була приблизно 1 м над торфовищем. Для калібрування використана біла еталонна панель зі спеціального оптичного матеріалу Spectralon (Danner et al., 2015).

## 2 Матеріали і методи

Мета даної роботи – дослідження особливостей вегетаційних індексів червоного краю та водних індексів, обчислених за даними спектрометрування наземного рослинного покриву спекторадіометром ASD FieldSpec 3FR над торфовищами в межах Шацького національного парку та в точках на тестових ділянках Бортницької станції аерації (БСА) в зоні полігона Вишеньки, їх зіставлення для підтвердження наявності торфу в приболотній території в зоні полігона ДЗЗ.

### 2.1 Ділянки досліджень

Досліджувані ділянки Шацького полігона – це торфовище в долині р. Прип'ять, що являє собою болото осушене, але спостерігається вторинне заболочування із заростями осоки, іванчаю. Меліорація проведена в 1982 р., всюди на ділянці знаходиться торф. Долина Прип'яті заростає самонасінними кущами (Azimov et al., 2022). Також є запущені орні землі – перелоги, на закинутих полях багато кропиви, бур'янів.

Ще одним об'єктом наших досліджень слугували чиста та брудна ділянки на території земельної площі, де знаходяться очисні споруди БСА на лівому березі Дніпра в межах Дарницького району Києва (тест-ділянки № 2а і 2б) (Дугін та ін., 2019). Ці земельні ділянки являють собою заплавні торф'яні луки Дніпра, по яких проходить магістральний канал БСА (колишній струмок Яушівка). Чиста тест-ділянка № 2а розташована між четвертим та п'ятим шлюзами магістрального каналу БСА на віддалі близько 20 км від системи аерації «Бортничі». Оскільки густі зарості очерету, який зростає вздовж магістрального каналу, виконують роль біофільтра, що очищає воду від забруднення, то ця тест-ділянка розглядалась як чиста, що в процесі виконання робіт в 2019 р. у цьому районі також підтвердилось результатами хімічних аналізів ґрунту та води (Лялько та ін., 2020). Бортницька тест-ділянка № 2б розташована перед першим шлюзом магістрального каналу БСА. Оскільки вона віддалена лише на 3 км від первинних та вторинних радіальних відстійників та аеротенків станції аерації «Бортничі», які належать до промзони «Осокорки» БСА, то ця ділянка розглядалась як забруднена. На цих ділянках зростає осока рання (*Carex praecox* Schreb), осока побережна (*Carex riparia* Curt.) та очерет південний (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.).

#### 2.1.2 Методика

За матеріалами і даними спектрометрування спекторадіометром ASD FieldSpec 3FR над торфовищами в межах Шацького національного парку в 2010 р. нами були досліджені особливості спектрів відбиття наземного покриву та червоного краю: позиції червоного краю REP (Horler, 1983), наземного хлоро-



фільного індексу TCI (Dash and Curran, 2004) та модифікованого нормованого різницевого індексу  $NDVI_{705}$  (Gitelson & Merzlyak, 1994; Лялько та ін., 2014). Значення цих індексів, обчислених за даними спектрометрування наземного рослинного покриву спекторадіометром ASD FieldSpec 3FR над торфовищами в межах території досліджень Шацького національного парку, були використані для верифікації результатів класифікації наземного покриву за даними космознімання території досліджень. На основі комплексного аналізу особливостей спектрів відбиття земних покривів у точках проведення наземного спектрометрування та значень вегетаційних індексів червоного краю були зроблені висновки, що одержані дані за цими індексами можуть бути використані для верифікації результатів класифікації наземного покриву над торфовищами за даними космознімання території досліджень. Маючи схему (карту, координати) розташування точок проведення наземного спектрометрування з характеристиками типу покриву в точках заміру та наземні дані спектрометрування спекторадіометром ASD FieldSpec 3FR на 28.06.2010 р., ми зіставили одержані результати з даними спектрометрування спекторадіометром ASD FieldSpec 3FR тестової точки приболотної території на 20.06.2019 р. та 23.06.2021 р. на Бортницькому тестовому полігоні (рис. 1). При зіставленні, керуючись дослідженнями авторів (Lees et al., 2020), ми використали додатково ще такі індекси: нормалізований різницевий вегетаційний NDVI; модифікований хлорофільний індекс CLm; розширений вегетаційний EVI; вологості MSI; пігментний SIPI та нормалізований різницевий водний NDWI (табл. 1, 2). Ці індекси були рекомендовані багатьма вченими для дослідження покриву змішаних видів торфовищ протягом усього вегетаційного періоду. Водні індекси та вегетаційні індекси, що наведені в дослідженні (Lees et al., 2020) і подані в табл. 2, ми використали для зіставлення значень, одержаних у тестових точках Шацького та Бортницького полігонів. Для сенсора Sentinel-2 широкодіапазонні індекси з табл. 2 обрахували з використанням коефіцієнтів відбиття, усереднених по діапазону довжин хвиль (див. табл. 1).

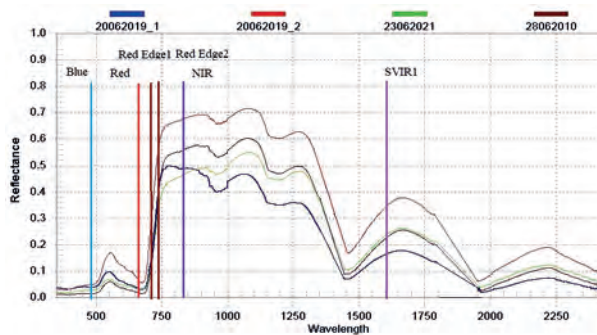


Рис. 1. Спектри відбиття, отримані спекторадіометром ASD FieldSpec<sup>®</sup> 3FR, та центральні довжини хвиль Sentinel-2 над торфовищами, зарослими осокою побережною (*Carex riparia*) за 2010, 2019 та 2021 рр.

Fig. 1. Reflectance spectra obtained by ASD FieldSpec<sup>®</sup> 3F spectroradiometer and central wavelengths of Sentinel-2 bands over peatlands overgrown with pond sedge (*Carex riparia*) in 2010, 2019 and 2021

Таблиця 1. Характеристика каналів Sentinel-2

Table 1. Characteristics of Sentinel-2 channels

Канали	Усереднені довжини хвиль, нм	Центральна довжина хвилі, нм
Blue	460–520	490
Red	650–680	665
Red Edge1	700–710	705
Red Edge2	730–750	740
NIR	780–900	840
SWIR1	1570–1660	1610

Згідно з даними табл. 2, крім трьох індексів червоного краю (REP, NDRE1 – аналог  $NDVI_{705}$ , MTCI), за якими проведено дослідження особливостей спектрів відбиття наземного покриву на торфовищі Шацького полігона (2010–2011 рр.), були пораховані рекомендовані авторами (Lees et al., 2020) індекси (див. табл. 2), які можуть бути показниками вмісту води та фотосинтезу в рослинному покриві на торфовищі. Широкодіапазонний нормалізований різницевий вегетаційний індекс NDVI та покращений вегетаційний індекс EVI одержані на різниці між червоним та ближнім інфрачервоним діапазонами спектра відбиття. Індекс EVI, враховуючи значення в синьому діапазоні, корегує вплив атмосферних аерозолів і вплив відбиття ґрунту. NDVI та EVI дають великомасштабні оцінки на основі вільно доступних супутникових даних, особливо при зміні з урахуванням

Таблиця 2. Характеристика вузько- та широкодіапазонних індексів REP, NDRE1, MTCI, NDVI, CLm, EVI, MSI, SIPI, NDWI

Table 2. Characteristics of narrow- and wide-range indices REP, NDRE1, MTCI, NDVI, CLm, EVI, MSI, SIPI, NDWI

Індекси	Рівняння для обчислення	Джерела посилань	Тип індексу
REP	$REP = 705 + 35 \frac{(R - R(705))}{(R(740) - R(705))}$ $\bar{R} = \frac{R(665) + R(780)}{2}$	(Horler, 1983; Clevers et al., 2017)	Вузькодіапазонний
NDRE1	$NDRE1(740,705) = \frac{R(740) - R(705)}{R(740) + R(705)}$	(Gitelson et al., 1994; Clevers et al., 2017)	Вузькодіапазонний
MTCI	$MTCI = \frac{R(740) - R(705)}{R(705) - R(665)}$	(Dash et al., 2004)	Вузькодіапазонний
NDVI	$NDVI = \frac{R(NIR) - R(RED)}{R(NIR) + R(RED)}$	(Rouse et al., 1973)	Широкодіапазонний
CLm	$CLm = \frac{R(750) - R(705)}{R(750) + R(705) - 2 * R(445)}$	(Lees et al., 2020; Sims and Gamon, 2002)	Вузькодіапазонний
EVI	$EVI = \frac{2.5 * (R(NIR) - R(RED))}{R(NIR) + 6 * R(RED) - 7.5 * R(BLUE) + 1}$	(Huete et al., 2002)	Широкодіапазонний
MSI	$MSI = \frac{R(SWIR1)}{R(NIR)}$	(Hunt et al., 1989; Lees et al., 2020)	Широкодіапазонний
SIPI	$SIPI = \frac{R(800) - R(445)}{R(800) - R(680)}$	(Penuelas et al., 1995; Harris, 2008)	Вузькодіапазонний
NDWI	$NDWI = \frac{R(NIR) - R(SWIR1)}{R(NIR) + R(SWIR1)}$	(Gao, 1996)	Широкодіапазонний

сезонного фактора і мають позитивні результати при дослідженні та класифікації покриву торфовища, де склад рослинності невідомий. Вегетаційний вузькодіапазонний індекс структурно-нечутливого пігменту SIPI враховує співвідношення хлорофіл/каротиноїд і вказує на підвищений стрес рослинного покриву. Діапазон індексу SIPI для зеленої рослинності становить від 0,8 до 1,8.

Модифікований хлорофільний індекс CLm фокусується на довжинах хвиль червоного краю, на тих же довжинах, як і наведені вище індекси, орієнтовані на різниці між червоною та NIR зонами (NDVI та EVI), де використовується червоний край, і дають кращі результати при дослідженні торфовищ. CLm – це один із кращих індексів для класифікації торфовищ, де склад рослинності невідомий (Lees et al., 2020). В табл. 2 наведені широкосмугові водні індекси: нормалізований водний різницевий індекс NDWI та індекс вологості MSI, які залежать від зон довжин хвиль NIR та SWIR1. Канали NDWI розраховували з використанням діапазонів NIR та SWIR1. На SWIR1 впливає як хлорофіл рослинності, так і вміст води, тоді як на NIR не впливає вміст води. Ці індекси працюють як показники води, доповнюючи один одного, і використовуються при

дослідженні торфовищ з різним видом рослинного покриву з урахуванням сезонного фактора (Lees et al., 2020) та дають позитивні результати при порівнянні з гіперспектральними індексами – показниками води.

Індекс NDWI (Gao, 1996) рекомендується використовувати в моделях посухи й управління зрошенням. Діапазон значень від -1 до +1. Інтервал від -1 до 0 – це покрив без рослинності і води, додатні значення свідчать про вміст води в рослинності. Значення індексу NDWI +1 показує воду (Gao, 1996).

Індекси, що використовуються в цьому дослідженні, були розраховані з використанням значень відбивальної здатності та усереднені по діапазону довжин хвиль.

В табл. 1, 2 представлені вегетаційні індекси, які застосовуються нами для даних Sentinel-2.

## 3 Результати

### 3.1 Обчислення вегетаційних індексів

За формулами, наведеними в табл. 2, обраховані індекси за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR, одержаними 28.06.2010 р. для

Таблиця 3. Індекси для восьми тестових точок торфовищ Шацького полігона (28.06.2010 р.)

Table 3. Indices for eight test points of peatlands of the Shatsk test area (June 28, 2010)

Індекси	Значення вегетаційних індексів на тестових точках (1–8) Шацького полігона з різним видом покриття							
	1	2	3	4	5	6	7	8
NDRE1	0,1075	0,4822	0,5254	0,5776	0,6446	0,4103	0,4554	0,1704
MTCI	1,2181	2,8472	3,3723	4,1312	4,4488	2,3739	2,8001	1,3187
NDVI	0,3882	0,8223	0,8313	0,8723	0,9429	0,7481	0,7939	0,4325
CLm	0,1622	0,5475	0,6051	0,7072	0,6832	0,4777	0,5179	0,2233
EVI	0,0823	1,0022	0,8940	1,0105	0,8779	0,5997	0,6553	0,2871
MSI	1,8351	0,4542	0,3973	0,4191	0,4105	0,6825	0,5868	1,2425
SIPI	1,4170	1,0361	1,0195	0,9793	1,0042	1,0710	1,0584	1,3839
NDWI	-0,2946	0,3753	0,4313	0,4093	0,4180	0,1887	0,2604	-0,1082

Таблиця 4. Значення індексів для тестових точок на Бортницькому полігоні за даними 20.06.2019 р. (№ 1) та 23.06.2021 р. (№ 2)

Table 4. Index values for test points at the Bortnychi test area according to the data of 20.06.2019 (No. 1) and 23.06.2021 (No. 2)

Індекси	Значення індексів на Бортницькому полігоні	
	№ 1 (20.06.2019)	№ 2 (23.06.2021)
NDRE1	0,5778	0,5692
MTCI	3,8350	3,4866
NDVI	0,8764	0,8790
CLm	0,6786	0,6436
EVI	0,8247	0,7482
MSI	0,3415	0,5181
SIPI	0,9838	1,0120
NDWI	0,4909	0,3205

восьми тестових точок Шацького полігона з різним видом покриття на торфовищі: 1) відкритий ґрунт на торфовищі з посадкою гарбузових; 2) зелена лугова трава, поле – заплава р. Прип'ять з потужним торфом, під перелогам, заросле бур'янами; 3) картопля в фазі цвітіння; 4) рослинний покрив (овес зелений) на заростаючому торфовищі; 5) рослинний покрив з осокою вздовж каналу, посіви злакових на сіно на березі меліораційного каналу; 6) рослинний покрив на березі меліораційного каналу, посіви злакових на сіно; 7) лучне різнотрав'я

на торфовищі, використовується під пасовище, невисокі злакові (тонконіг), місцями ситник; 8) скошена трава, частково засихаюча, проглядає відкрита поверхня торфу із сухим рослинним покривом. Результати обчислень індексів на тестових точках (1–8) Шацького полігона з різним видом покриття представлені в табл. 3. Ці ж індекси (див. табл. 2) обраховані і для тестової точки приболотної території на 20.06.2019 р. та 23.06.2021 р. на Бортницькому полігоні з осокою бережною (*Carex riparia*) (табл. 4).

В табл. 4 наведені розрахунки восьми індексів, одержаних для тестових точок приболотної території Бортницького полігона з осокою бережною (*Carex riparia*) в червні 2019 та 2021 рр.: № 1 – значення індексів, отриманих за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR 20.06.2019 р., і № 2 – значення індексів, одержаних за даними ASD FieldSpec 3FR 23.06.2021 р.

В табл. 5 подані коефіцієнти кореляції значень восьми індексів тестової точки приболотної території Бортницького полігона з осокою бережною на дати 20.06.2019 та 23.06.2021 зі значеннями індексів восьми тестових точок Шацького полігона на 28.06.2010 р. з різним видом покриття на торфовищі. Згідно кореляції Пірсона значення коефіцієнтів кореляції майже не відрізняються на різні дати (табл. 5). Різниця в часі зйомок даних на території Бортницького полігона спектрорадіометром ASD FieldSpec 3FR становить 2 роки. Значення індексів вираховувались за даними зйомки в червні місяці.

Таблиця 5. Значення коефіцієнтів кореляції індексів у тестових точках Шацького полігона за 28.06.2010 р. зі значеннями індексів тестової точки на Бортницькому полігоні за 20.06.2019 р. (№ 1) та 23.06.2021 р. (№ 2)

Table 5. The value of the correlation coefficients of the indices at the test points of the Shatsk test area for 28.06.2010 with the values of the indices of the test point at the Bortnychi test area for 20.06.2019 (No. 1) and 23.06.2021 (No. 2)

Дата тестової точки на Бортницькому полігоні	Кореляція індексів восьми тестових точок Шацького полігона (28.06.2010) з індексами тестової точки на Бортницькому полігоні (№ 1 і 2)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20.06.2019 (№ 1)	0,30	0,98	0,99	0,99	0,99	0,95	0,98	0,49
23.06.2021 (№ 2)	0,38	0,98	0,99	0,99	0,99	0,97	0,99	0,56

Таблиця 6. Значення індексу REP (див. табл. 2) для тестових точок Шацького полігона за 28.06.2010 р. та на Бортницькому полігоні за 20.06.2019 р. (№ 1) та 23.06.2021 р. (№ 2) за даними спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR

Table 6. The value of the REP index (see Table 2) for the test points of the Shatsk test area for 28.06.2010 and at the Bortnychi test area for 20.06.2019 (No. 1) and 23.06.2021 (No. 2) according to the spectroradiometer ASD FieldSpec 3FR data

Індекс	Значення індексу REP на тестових точках (1–8) Шацького полігона з різним видом покриття (28.06.2010 р.)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
REP	725,55	721,27	720,89	725,15	725,39	719,50	722,18	715,68

Індекс	Значення індексу REP на Бортницькому полігоні	
	№ 1 (20.06.2019)	№ 2 (23.06.2021)
REP	722,37	723,69

В табл. 6 показані значення вегетаційних індексів REP для тестових точок Шацького та Бортницького полігонів.

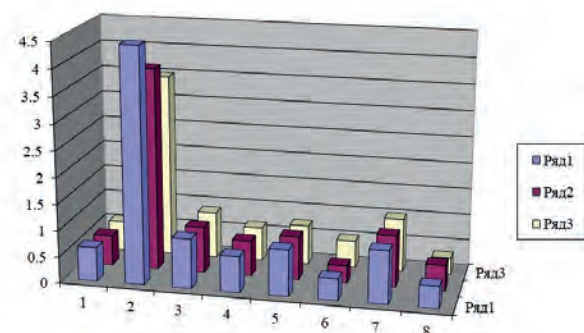
Чотириканальний індекс REP (665, 705, 740, 780) реагує на хлорофільний стан рослинного покриття Землі і залежить від стану довкілля внаслідок забруднення води та ґрунтів. Ці зміни впливають на спектри відбиття рослинного покриття та спричиняють зміни нахилу кривої спектра в червоному краї (665–783 нм) і зсуви значень REP – довжини хвилі з максимальним значенням нахилу кривої відбиття в цій області. Значення зсувів REP можуть слугувати навіть індикатором забруднення важкими металами рослинного покриття та використовуватися в різних екологічних моделях (Clevers et al., 2017; Лялько та ін., 2014, 2020).

## Обговорення отриманих результатів

Середнє значення REP на тестових точках (1–8) Шацького полігона з різним видом покриття та на Бортницькому полігоні близькі і мають значення 723,03 нм на Бортницькому полігоні та 723,2 нм – на Шацькому. Всі наведені вище значення індексів були одержані за даними, знятими спектрорадіометром ASD FieldSpec 3FR в червні місяці. Маючи середні значення REP для тестових точок для Бортницького полігона і значення коефіцієнтів кореляції за даними індексів для тестових точок Шацького полігона ДЗЗ, які майже не відрізняються на різні дати (див. табл. 5) при різниці в часі зйомок даних на території Бортницького полігона, можна припустити, що це одна із ознак торфовища на приболотних територіях.



Наводимо тривимірну гістограму (рис. 2.) зображень значень восьми індексів (див. табл. 3) для трьох тестових точок: ряд 1 – точка торфовища Шацького полігона (28.06.2010 р.), це зелений покрив з осокою вздовж каналу та посіви злакових на сіно на березі меліораційного каналу; ряд 2 – точка приболотної території з осокою побережною (*Carex riparia*) Бортницького полігона (20.06.2019 р., № 1) (див. табл. 4); ряд 3 – точка приболотної території з осокою побережною (*Carex riparia*) Бортницького полігона (23.06.2021 р., № 2) (див. табл. 4). Як видно з гістограми, поведінка індексів NDRE1, MTCl, NDVI, CLm, EVI, MSI, SIPI, NDWI для трьох тестових точок з зеленим покривом на різні роки в червні місяці для торфовища Шацького і Бортницького полігонів майже ідентична, що може підтверджувати ознаку торфовища на приболотних територіях.



**Рис. 2.** Зображення значень восьми індексів NDRE1, MTCl, NDVI, CLm, EVI, MSI, SIPI, NDWI для трьох тестових точок з осокою побережною (*Carex riparia*).

Ряд 1 – значення індексів зеленого покриву з осокою на тест-точці Шацького полігона (28.06.2010 р.), ряд 2 – для зеленого покриву з осокою на тест-точці приболотної території з осокою побережною (*Carex riparia*) Бортницького полігона (20.06.2019 р.), ряд 3 – для зеленого покриву з осокою на тест-точці приболотної території з осокою побережною (*Carex riparia*) Бортницького полігона (23.06.2021 р.). Горизонтальна вісь – порядковий номер індексу із табл. 3, по вертикальній осі – значення індексів

**Fig. 2.** Representation of 8 index values, such as NDRE1, MTCl, NDVI, CLm, EVI, MSI, SIPI, NDWI (Table 3) for three test points with pond sedge *Carex riparia*. Row 1 – index values of green cover with sedge at the test point of the Shatsk test area (June 28, 2010). Row 2 – index values for green cover with sedge at the test point within the wetland area with *Carex riparia* for the Bortnychi test area (June 20, 2019), Row 3 – index values for green cover with sedge at the test point within the wetland area with *Carex riparia* for the Bortnychi test area (June 23, 2021). The horizontal axis is the number of the index from Table 3; the vertical axis is the index value

Для індексів, зображених на гістограмі рис. 2, стандартне відхилення – міра того, наскільки широко розкидані точки даних щодо їх середнього; для індексів у рядах 1–3 практично рівні: для ряду 1 стандартне відхилення дорівнює 1,2; для рядів 2 і 3 – 1, що ще раз показує ідентичність ознак торфовища на приболотній території Шацького полігона з тестовими точками Бортницького полігона за даними червня місяця.

Для підтвердження ідентичності ознак торфовища одержані значення дев'яти індексів (див. табл. 2) по зображенню з Sentinel-2 (10.05.2021 р.) на тестових точках № 1 і 2 приболотної території з осокою побережною Бортницького полігона та на тестовій точці з осокою побережною Шацького полігона (11.05.2021 р.). Значення індексів на травень місяць представлені в табл. 7.

**Таблиця 7.** Значення індексів на тест-точках № 1, 2 Бортницького полігона за даними знімка Sentinel-2 (11.05.2021 р.)

**Table 7.** Index values at test points No. 1, 2 of the Bortnychi test area according to Sentinel-2 image data (May 11, 2021)

Індекси	№ 1	№ 2
NDRE1	0,44811	0,50218
MTCl	0,39367	0,36047
NDVI	0,73507	0,72803
CLm	0,06144	-0,00116
EVI	2,21967	1,91982
MSI	0,11770	0,17450
SIPI	0,70549	0,72857
NDWI	1,06388	1,00786
REP	715,7 нм	716,5 нм

Коефіцієнт кореляції Пірсона для восьми значень індексів тестової точки № 1 приболотної території Бортницького полігона з осокою побережною зі значеннями на тестовій точці Шацького полігона з осокою побережною № 2 високий і дорівнює 0,995; значення вегетаційного індексу REP для тестових точок № 1 і 2 відрізняються на 1 нм. Стандартне відхилення для восьми індексів у рядах № 1 та 2 практично однакове і дорівнює  $\approx 0,6$ . Такі результати одержані за даними Sentinel 2 за 11 травня 2021 р.

Таблиця 8. Дати зображень знімків Sentinel-2

Table 8. Dates of Sentinel-2 images

Шацький полігон Д33	
2021.05.11	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210511T093031_20210511T093341_T34UFC
2021.07.13	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210713T094031_20210713T094349_T34UFC
2021.09.08	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210908T093031_20210908T093342_T34UFC
Бортницький полігон Д33	
2021.09.09	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210909T085601_20210909T090330_T36UUA
2021.07.14	COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210714T090601_20210714T090825_T35UQR
2021.05.10	CPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210510T090549_20210510T090751_T35UQR

Для підтвердження ідентичності ознак торфовища на приболотних територіях за отриманими значеннями вегетаційних індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP із зображень знімків Sentinel-2 були розглянуті тест-точки з чистої ділянки на три дати знімків Sentinel-2 (10.05.2021, 14.07.2021, 09.09.2021), а також із забрудненої ділянки Бортницького полігона з осокою побережною на ці ж дати знімків Sentinel-2. Вони були зіставлені з даними трьох знімків Sentinel-2 на тестових точках з осокою побережною Шацького полігона (11.05.2021, 13.07.2021, 09.08.2021) (табл. 8).

При дослідженні поведінки індексів (див. табл. 2), одержаних для різних дат на тестових точках з осокою побережною Шацького торф'яного полігона та на тестових точках приболотної території Бортницького полігона для знімків Sentinel-2, обмежились вегетаційними індексами NDRE1, NDVI, SIPI та REP. Індекс NDRE1 – аналог NDVI<sub>705</sub>. Індекс NDRE1(740,705) працює на ділянці спектра в зоні переходу від видимого червоного до ближнього інфрачервоного в зоні червоного краю. Для підтвердження точності одержаних даних цей індекс використовується з вегетаційним індексом NDVI (NIR, RED), який працює протягом усього сезону, крім випадків, коли вегетаційний покрив незначний, тоді його відбивальна здатність дуже низька.

При використанні індексу REP особливу роль відіграє довжина хвилі, на якій швидкість зміни спектра максимальна. Ця точка називається позицією червоного краю – REP і розглядається як вегетаційний індекс, який можна

визначати за спектрометричними даними. Значення зсувів REP можуть слугувати індикатором забруднення рослинного покриву в різних екологічних моделях (Clevens et al., 2017) і використовуватися при дослідженні торфовищ за допомогою Д33 з високою розрізненістю (Räsänen et al., 2020). Вегетаційний індекс рослинності SIPI, згідно з (Gomes et al., 2016), застосовують для аналізу вегетації рослин із різною структурою. Підвищені значення SIPI сигналізують про те, що рослини перебувають у стані стресу або хворі. Діапазон для зеленої рослинності становить від 0,8 до 1,8.

На прикладі Шацького полігона зроблено обробку знімка Sentinel-2 за 10.05.2021 р. у середовищі Google Earth Engine (рис. 3). Програмний код обробки міститься в табл. 9.

Значення вегетаційних індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP із зображень знімків Sentinel-2 наведені в табл. 10 та на рис. 4–6.

Для значень вегетаційних індексів NDRE1, NDVI та SIPI, поданих у табл. 10, була обчислена кореляція для трьох дат (10.05.2021, 14.07.2021, 09.09.2021) чистої ділянки Бортницького полігона з осокою побережною знімків Sentinel-2 з даними, одержаними для ділянок Шацького полігона з осокою побережною знімків Sentinel-2 на дати 11.05.2021, 13.07.2021, 09.08.2021 рр. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,78 для  $n = 9$  ( $n$  – розмір масиву даних) і 0,54,  $n = 9$  для тих же трьох дат для забрудненої ділянки Бортницького полігона з осокою побережною знімків Sentinel-2 на ці ж три дати.

Таблиця 9. Алгоритм обробки зображення Sentinel-2 в середовищі Google Earth Engine

Table 9. Sentinel-2 image processing algorithm in the Google Earth Engine environment

<p><b>Етап 1. Вибір колекції Sentinel-2 та фільтрація за датою та областю</b></p>	<pre> javascript Copy code var data = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED"); var image = data.filterDate('2021-05-10', '2021-05-12'); var dataset = image.filterBounds(geometry)                     .select(['B4', 'B3', 'B2'])                     .sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE');</pre>
<p><b>Етап 2. Відображення найменш хмарного зображення на мапі</b></p>	<pre> javascript Copy code var image2 = ee.Image('COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED/20210511T093031_20210511T093341_T34UFC')               .select(['B1', 'B2', 'B3', 'B4', 'B5', 'B6', 'B7', 'B8', 'B9']); var image2vis = image2.select(['B4', 'B3', 'B2']); var trueColor = {min: [150, 150, 150], max: [1800, 1800, 1800]}; Map.addLayer(image2vis, trueColor, 'Latter image');</pre>
<p><b>Етап 3. Розрахунок та візуалізація індексу NDVI</b></p>	<pre> javascript Copy code var NDVI = image2.expression('(BAND8 - BAND4)/(BAND8 + BAND4)',                              {                                'BAND4': image2.select('B4'),                                'BAND8': image2.select('B8')                              }); var NDVI_Vis = {min: 0, max: 0.6, palette: ['D77B3F', 'E8E81F', '24B32C']}; Map.addLayer(NDVI, NDVI_Vis, 'NDVI');</pre>
<p><b>Етап 4. Розрахунок та візуалізація індексу NDRE</b></p>	<pre> javascript Copy code var NDRE = image2.expression('(BAND9 - BAND5)/(BAND9 + BAND5)',                              {                                'BAND9': image2.select('B9'),                                'BAND5': image2.select('B5')                              }); var GreenNDVI_Vis = {min: 0, max: 0.6, palette: ['D77B3F', 'E8E81F', '24B32C']}; Map.addLayer(NDRE, GreenNDVI_Vis, 'NDRE');</pre>
<p><b>Етап 5. Розрахунок та візуалізація індексу REP</b></p>	<pre> javascript Copy code var REP = image2.expression('700+40*(((BAND4+BAND7)/2)-BAND5)/(BAND6-BAND5)', {   'BAND4': image2.select('B4'),   'BAND5': image2.select('B5'),   'BAND6': image2.select('B6'),   'BAND7': image2.select('B7') }); var REP_Vis = {min: 0, max: 0.6, palette: ['D77B3F', 'E8E81F', '24B32C']};</pre>
<p><b>Етап 6. Розрахунок та візуалізація індексу NDRE1</b></p>	<pre> javascript Copy code var NDRE1 = image2.expression('(BAND8A - BAND5)/(BAND8A + BAND5)', {   'BAND8A': image2.select('B8A'),   'BAND5': image2.select('B5') }); var NDRE1_Vis = {min: 0, max: 0.6, palette: ['D77B3F', 'E8E81F', '24B32C']};</pre>
<p><b>Етап 7. Розрахунок та візуалізація індексу SIPI</b></p>	<pre> javascript Copy code var SIPI = image2.expression('(BAND7 - BAND4)/(BAND7 + BAND4)', {   'BAND7': image2.select('B7'),   'BAND4': image2.select('B4') }); var SIPI_Vis = {min: 0, max: 0.6, palette: ['D77B3F', 'E8E81F', '24B32C']};</pre>
<p><b>Етап 8. Збирання всіх зображень та індексів у колекцію та збереження в GeoTIFF</b></p>	<pre> javascript Copy code var col = ee.ImageCollection.fromImages([image2, NDVI, NDRE, REP, NDRE1, SIPI]); var bands = col.toBands(); bands = bands.toFloat();  Export.image.toDrive({   image: bands,   region: geometry,   fileFormat: 'GeoTIFF' });</pre>

Таблиця 10. Значення індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP на різні дати із зображень знімків Sentinel-2

Table 10. Values of NDRE1, NDVI, SIPI and REP indices for different dates from Sentinel-2 images

Індекси	Бортницький полігон, тест-ділянка № 2		
	10.05.2021	14.07.2021	09.09.2021
NDRE1	0,44811	0,48722	0,48703
NDVI	0,73507	0,65919	0,69709
SIPI	0,70549	0,66113	0,68447
REP	715,656	718,944	717,089

Індекси	Бортницький полігон, тест-ділянка № 1		
	10.05.2021	14.07.2021	09.09.2021
NDRE1	0,36775	0,44876	0,42923
NDVI	0,56817	0,62892	0,73261
SIPI	0,52703	0,64561	0,70826
REP	714,106	718,014	715,288

Індекси	Шацький полігон		
	11.05.2021	13.07.2021	09.08.2021
NDRE1	0,50218	0,53101	0,43513
NDVI	0,72803	0,76227	0,60622
SIPI	0,72857	0,77568	0,58262
REP	716,532	717,890	717,023

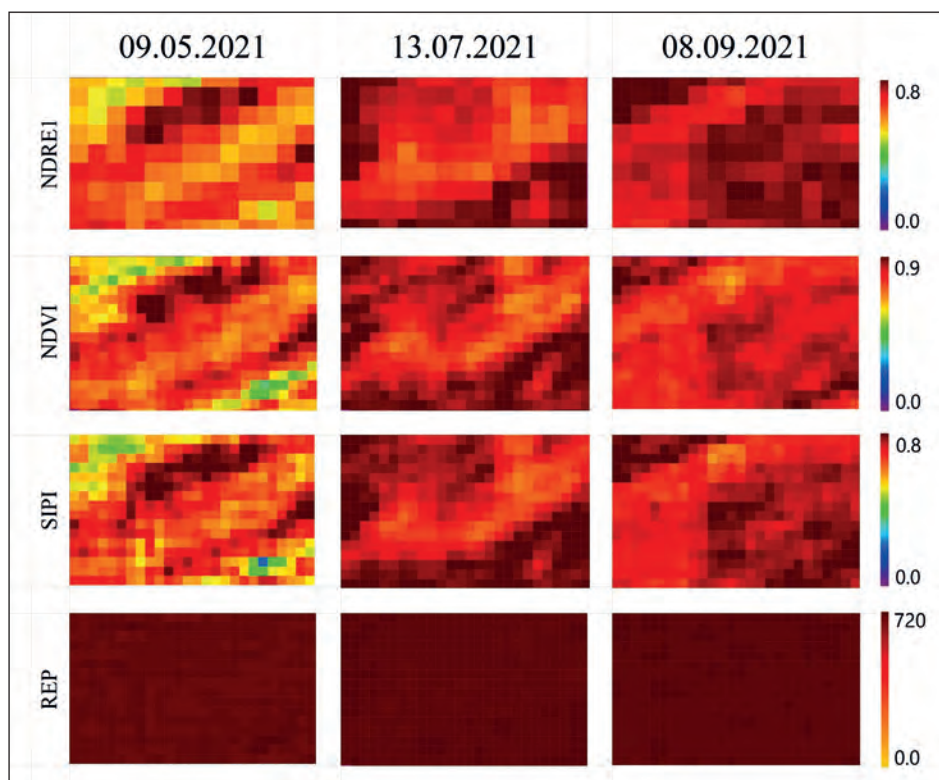


Рис. 4. Значення індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP із зображень знімків Sentinel-2 для Шацького полігона

Fig. 4. Values of NDRE1, NDVI, SIPI and REP indices obtained from Sentinel-2 images for the Shatsk test area



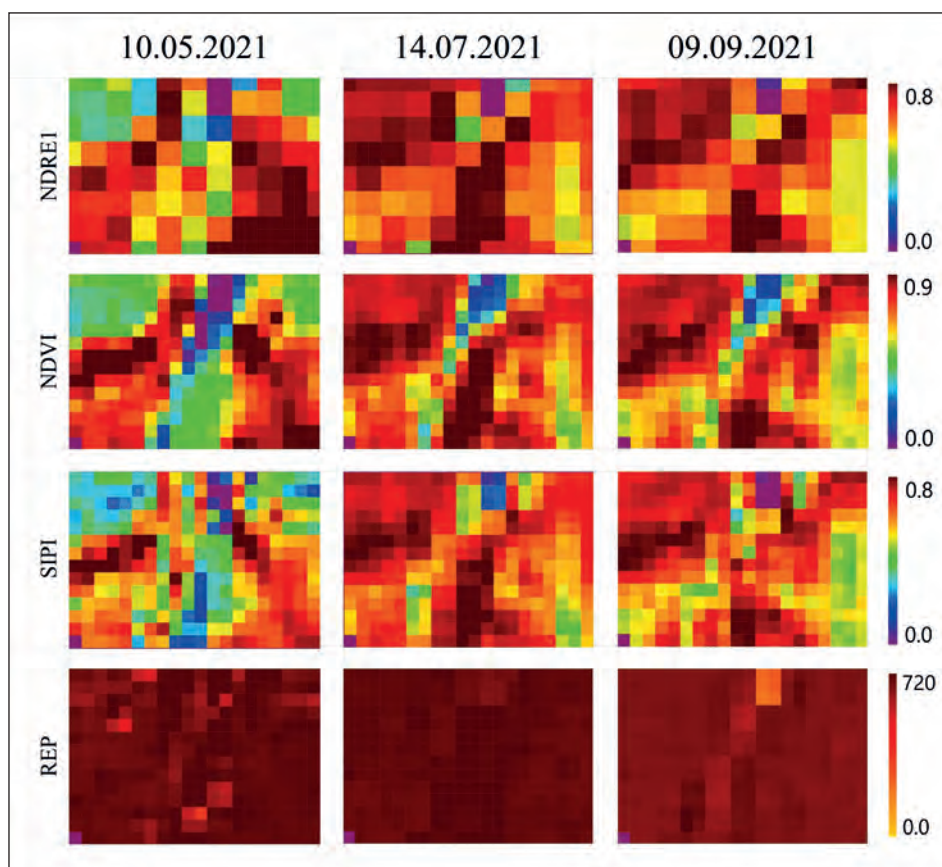


Рис. 5. Значення індексів NDREI, NDVI, SIPI та REP із зображень знімків Sentinel-2 для Бортницького полігона (тест-ділянка № 1)

Fig. 5. Values of NDREI, NDVI, SIPI and REP indices obtained from Sentinel-2 images for Bortnychi test area (test point No. 1)

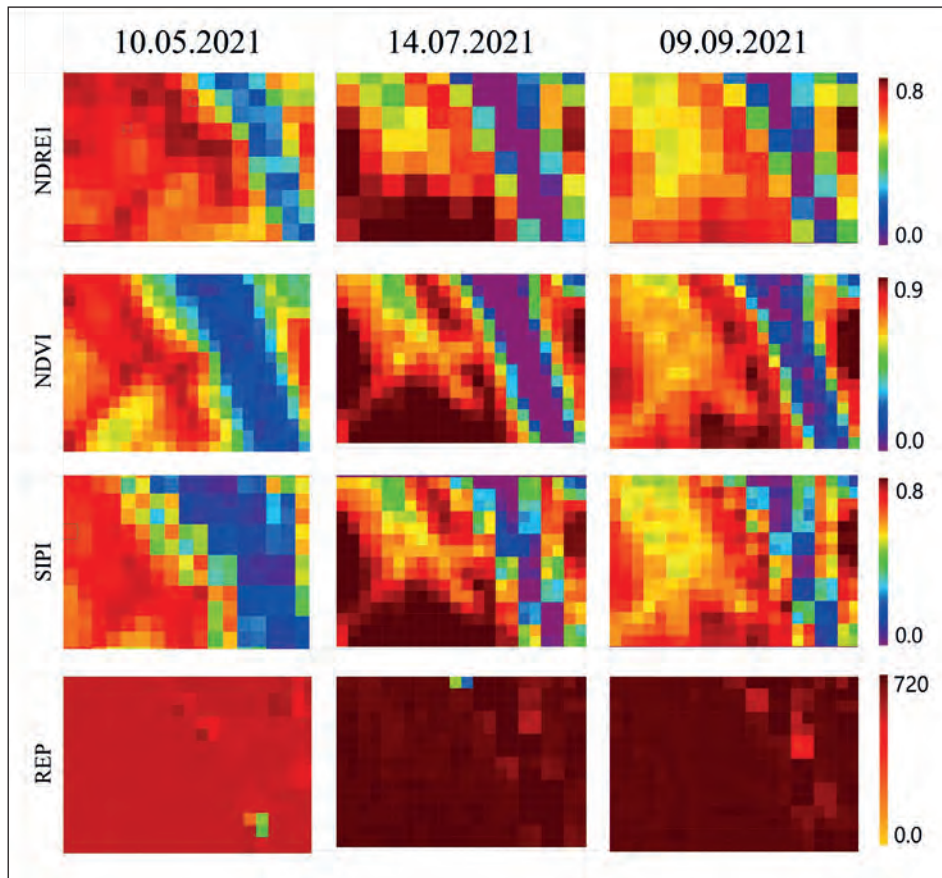


Рис. 6. Значення індексів NDREI, NDVI, SIPI та REP із зображень знімків Sentinel-2 для Бортницького полігона (тест-ділянка № 2)

Fig. 6. Values of NDREI, NDVI, SIPI and REP indices from Sentinel-2 images for Bortnychi test area (test point No. 2)

Для значень вегетаційного індексу REP (див. табл. 8) кореляція для значень ділянок Бортницького полігона та значень ділянок Шацького полігона з осокою бережною досить висока і дорівнює 0,82 при  $n = 6$  ( $n$  – кількість тестових точок на ділянках № 1 та 2 Бортницького полігона).

Значущість лінійної регресії між вегетаційними індексами NDRE1, NDVI, SIPI та REP, отриманими з Sentinel-2 та спектрорадіометра ASD FieldSpec® 3FR, наведено у табл. 11 та виражено відповідними коефіцієнтами детермінації, а також значеннями середньоквадратичної похибки (Stankevich, 2022).

Як випливає з табл. 11, спостерігаються достатньо високі значення коефіцієнта детермінації для індексів NDRE, NDVI, а середньоквадратична похибка регресії дуже мала.

Ці всі ознаки можуть підтверджувати ідентичність торфовищ з осокою бережною (*Carex riparia*) на ділянці Шацького полігона з такими на ділянці Бортницького полігона.

В результаті формалізації протестованої методики ми пропонуємо алгоритм обробки матеріалів, отриманих з Sentinel-2 та спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR, для картування торфовищ за багатоспектральними супутниковими знімками. Схему алгоритму представлено на рис. 7. Запропонований алгоритм дій включає два основних етапи: перший – навчання, що передбачає отримання даних наземних спостережень і розрахунок вузькодіапазонних спектральних індексів, визначення коефіцієнтів регресії та розрахунки коефіцієнтів детермінації для ідентифікації торфовищ. Другий етап – власне обробка, який включає отримання супутникових зображень



Рис. 7. Схема алгоритму визначення меж торфовищ за супутниковими та наземними завірковими даними  
 Fig. 7. Algorithm scheme for determining the boundaries of peatlands using satellite and ground validation data

Sentinel-2 рівня 2A (L2A), які вже піддано атмосферній корекції, та розрахунок широкодіапазонних спектральних індексів. Продукт Sentinel-2 L2A є обробленим варіантом супутникових знімків зі значеннями оптичного відбиття земних покривів, що сприяє точному аналізу властивостей земної поверхні для різноманітних застосувань. Далі за заздалегідь отриманими регресійними залежностями широкодіапазонні індекси для Sentinel-2 перераховуються на вузькодіапазонні NDVI, NDRE1, SIPI та REP, за якими й приймається рішення про наявність чи відсутність торфовища. Насамкінець одержані піксельні результати обробки наносяться на карто-схему території дослідження.

Таким чином, використання індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP дає можливість визначити наявність торфу на досліджуваних ділянках.

## Висновки

Враховуючи корисні властивості торфу, зокрема його потенціал як альтернативи традиційним джерелам палива, були проведені дослідження вегетаційних та водних індексів

Таблиця 11. Значення коефіцієнта детермінації та середньоквадратична похибка

Table 11. Value of the coefficient of determination and root mean square error

Індекси	Коефіцієнт детермінації	Середньоквадратична похибка
NDRE	0,7127947	0,0488236
NDVI	0,7854473	0,0563897
SIPI	0,429059	0,0184572
REP	0,5385368	1,6378178

червоного краю, а також водних індексів, обчислених на основі спектрометрії наземного рослинного покриву над торфовищами. Тест-ділянки були обрані в межах Шацького національного парку та на тестових ділянках БСА в зоні полігона Вишеньки для підтвердження наявності торфу в прибережній території в межах полігона.

На території Шацького національного парку проводилися дослідження за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR у 2010 р., а також за даними супутникових зображень Sentinel-2 у 2019 та 2021 рр. Основними видами рослинності на цій ділянці є осока та іван-чай. Меліорація проводилася у 1982 р., і торф виявлено практично всюди на цій території.

Були вивчені показники червоного краю REP, хлорофільного індексу TCI та модифікованого нормалізованого різницевого індексу NDVI<sub>705</sub>. Отримані дані використані для перевірки результатів класифікації наземного покриву на основі супутникового зондування в області досліджень на торфовищах. Для порівняння результатів проведеного дослідження застосовані додаткові вегетаційні індекси, такі як NDVI, EVI, SIPI, а також індекси, які вказують на вологість та фотосинтез у рослинному покриві. NDVI та EVI надали позитивні результати для класифікації торфовищ, особливо в разі невідомого складу рослинності. Індекс SIPI вказав на підвищений стрес рослинного покриву. Модифікований хлорофільний індекс CLm не показав очікуваного результату. Середні значення індексу REP на тестових точках Шацького та Бортницького полігонів були подібними і становили відповідно 723,2 та 723,03 нм. Ці значення були отримані у червні місяці, і їх схожість свідчить про можливу наявність ознак торфовища на обох територіях. Гістограма значень восьми індексів для трьох тестових точок на різних територіях і в різні роки в червні місяці свідчить про практично однакову поведінку цих індексів. Стандартні відхилення для цих індексів показують подібність даних і становлять 1,2 для ряду 1 та 1 для рядів 2 і 3, що підтверджує ідентичність ознак торфовища на обох територіях у червні місяці. Додатково значення дев'яти індексів були отримані із зображень Sentinel-2 для тестових точок

№ 1, 2 Бортницького (10.05.2021 р.) та Шацького полігонів (11.05.2021 р.). Ці значення також підтверджують ідентичність ознак торфовища на обох територіях. Отже, отримані дані та результати аналізу свідчать про можливість наявності ознак торфовища на прибережних територіях Шацького та Бортницького полігонів.

Аналіз результатів показує високу кореляцію ідентичних ознак торфовища на прибережних територіях Шацького та Бортницького полігонів. Коефіцієнт кореляції Пірсона для восьми індексів між тестовою точкою № 1 Бортницького полігона з осокою бережною і тестовою точкою № 2 Шацького полігона з осокою бережною дуже високий і становить 0,995. Це свідчить про дуже сильний зв'язок між цими індексами на обох територіях. Додатково аналіз ідентичності ознак торфовища проводився за допомогою вегетаційних індексів NDRE1, NDVI, SIPI та REP для різних дат знімків Sentinel-2. Вказані значення цих індексів практично однакові для обох територій у різні роки, як видно на супутникових знімках Sentinel-2, що підтверджує подібність ознак торфовища. Таким чином, проведено експериментальне дослідження вузькодіапазонних спектральних індексів спектрорадіометром ASD FieldSpec 3FR та широкодіапазонних спектральних індексів багатоспектральним зображенням Sentinel-2. Найкращі результати дають вегетаційні індекси NDRE1, NDVI, SIPI та REP. Для подальших досліджень бажано включити бібліотеку прецизійних спектрів високої розрізненності (не гірше 1–2 нм) як у VNIR, так і SWIR областях, щоб забезпечити можливість реконструкції сигналів у всіх спектральних діапазонах будь-якої системи візуалізації.

Отже, на основі розрахунку коефіцієнта кореляції, результатів аналізу вегетаційних індексів, коефіцієнта детермінації, а також визначення середньоквадратичної похибки можна припустити, що обидві прибережні території мають ідентичні ознаки торфовища. Вегетаційні індекси NDRE1, NDVI, SIPI та REP можна використовувати для визначення меж торфовищ, значну частину яких займає осока бережна (*Carex riparia*), що слугує одним із індикаторів торфовища.



СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Багатоспектральні методи дистанційного зондування Землі в задачах природокористування: Лялько В.І., Попов М.О. (ред.). Київ: Наукова думка, 2006. 360 с.
- Вдовиченко А.І. Торф як альтернативне високоефективне екологічне джерело енергії на місцевому і регіональному рівнях. Житомир: Info, 2023. [https://www.zhitomir.info/post\\_3104.html](https://www.zhitomir.info/post_3104.html)
- Дугін С.С., Сибірцева О.М., Голубов С.І., Дорофей Є.М. Верифікація результатів обробки спектральних даних супутника Sentinel-2A, наземного спектрорадіометра ASD Field Spec3FR і системи реєстрації мінливості параметрів середовища DJI STS-VIS. *Укр. журн. дистанц. зондування Землі*. 2019. Т. 21. С. 29–39.
- Зацерковний В.І., Оберемок Н.В., Тишаєв І.В., Наливайко О.М. Застосування геоінформаційних технологій в моделюванні родовищ корисних копалин. *Управління розвитком складних систем*. 2017. № 30. С. 147–155.
- Лялько В.І., Жолобак Г.М., Дугін С.С., Сибірцева О.М., Голубов С.І., Дорофей Є.М., Поліщук О.В. Експериментальні дослідження особливостей кругообігу вуглецю в системі «атмосфера–рослинність» на території водно-болотних угідь лісостепової зони України із залученням дистанційних спектро- та газометричних зйомок за сучасних кліматичних змін. *Укр. журн. дистанц. зондування Землі*. 2020. Т. 24. С. 15–23.
- Лялько В.І., Шпортюк З.М., Сибірцева О.М., Дугін С.С. Дослідження гіперспектральних індексів червоного краю для визначення змін рослинного покриву над нафтовим родовищем за даними спектрометричної зйомки. *Геол. журн.* 2014. № 3 (348). С. 95–103.
- Попов М.А., Станкевич С.А., Архипов А.І., Титаренко О.В. Про можливість дистанційного пошуку покладів вуглеводнів з використанням комп'ютерного асистента геолога. *Укр. журн. дистанц. зондування Землі*. 2018. № 16. С. 34–40. DOI: 10.36023/ujrs.2018.16.119
- Снежкін Ю.Ф., Корінчук Д.М. Торф – ефективний альтернативний вид палива. *Теплофізика та теплоенергетика*. 2022. Т. 44, № 3. С. 5–15.
- Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripyat reclamation system of the Chornobyl Exclusion Zone. *XVI International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”* (Kyiv, Ukraine, November 15–18, 2022). Kyiv, 2022. P. 1–6.
- Clevers J., Kooistra L., Marnix V.D.B. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sens.* 2017. Vol. 9. P. 405. doi:10.3390/rs9050405
- Clevers J.G.P.W., Kooistra L. Assessment of heavy metal contamination in river floodplains by using the red-edge index. *The 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Herrsching, May 13–16, 2003. Herrsching, 2003. P. 173–179.
- Danner M., Locherer M., Hank T., Richter K. Spectral sampling with the ASD FieldSpec 4 – theory, measurement, problems, interpretation. *EnMAP Field Guides Technical Report*. Potsdam: GFZ Data Services, 2015. 25 p. doi: 10.2312/enmap.2015.008
- Dash J., Curran P.J. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 2004. Vol. 25. P. 5403–5413.
- Earth Systems Change over Eastern Europe. (Co-editors P. Groisman, V. Lyalko). Kyiv: Akademperiodyka, 2012. 488 p.
- Gao B.-C. NDWI? A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 1996. Vol. 58. P. 257–266.
- Gitelson A., Merzlyak M.N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*. 1994. Vol. 143. P. 286–292.
- Gomes V.P., Galvıncio J.D., Ferreira P.S., Silva J.F., Ferreira H.S. Hyperspectral analysis in areas of Caatinga degraded in the municipality of Sertânia – PE. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*. 2016. Vol. 6, iss. 1. P. 262–269. doi:10.5935/1984-2295.20160111
- Harris A. Spectral reflectance and photosynthetic properties of Sphagnum mosses exposed to progressive drought. *Ecohydrology*. 2008. Vol. 1, iss. 1. P. 35–42.
- Horler D.N.H., Dockray M., Barber J. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 1983. Vol. 4, iss. 2. P. 273–288.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 83 (1–2). P. 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hunt E.R., Rock B.N. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.* 1989. Vol. 30 (1). P. 43–54.
- Lees K.J., Artz R.R., Khomik M. et al. Using spectral indices to estimate water content and GPP in Sphagnum moss and other peatland vegetation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2020. Vol. 58, iss. 7. P. 4547–4557. <https://centaur.reading.ac.uk/88076>
- Nebesny V.B., Grodzynska G.A., Samchuk A.L., Dugin S.S. Spectrophotometric express method of bioindication of park system. *Science and Innovation*. 2020. Vol. 16 (4). P. 74–82.
- Nebesnyi V.B., Grodzynska G.A., Samchuk A.L., Dugin S.S., and Honchar H.Yu. Spectrophotometric Express Method in Bioindication of Park Ecosystems. *Sci. innov.* 2020. Vol. 16, No. 4. P. 74–82. <https://doi.org/10.15407/scine16.04.074>
- Penuelas J., Filella I., Gamon J.A. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.* 1995. Vol. 131, iss. 3. P. 291–296.



- Räsänen A., Juutinen S., Kalacska M., Aurela M., Heikkinen P., Mäenpää K., Rimali A., Virtanen T. Peatland leaf-area index and biomass estimation with ultra-high resolution remote sensing. *GIScience and Remote Sensing*. 2020. Vol. 57, iss.7. P. 943–964. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1829377>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, Greenbelt, December 10-14, 1973. SP-351, 309–317.
- Sims D.A., Gamon J.A. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ.* 2002. Vol. 81, iss. 2-3. P. 337–354.
- Stankevich S.A. Accuracy of narrow-band spectral indices estimation by wide-band remote sensing data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2022. Vol. 9, No. 1 P. 4–7. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.209>

Надійшла до редакції 12.09.2023

Надійшла у ревізованій формі 28.10.2023

Прийнята 08.12.2023

## REFERENCES

- Azimov O., Tomchenko O., Shevchenko O., Dorofey Ye. 2022. Satellite monitoring of the natural and technogenic events on the left-bank Pripjat reclamation system of the Chornobyl Exclusion Zone. *XVI International Scientific Conference "Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment"* (Kyiv, Ukraine, November 15-18, 2022). Kyiv, p. 1–6.
- Clevers J., Kooistra L., Marnix V.D.B. Using Sentinel-2 data for retrieving LAI and leaf and canopy chlorophyll content of a potato crop. *Remote Sens.* 2017, 9: 405. doi:10.3390/rs9050405
- Clevers J.G.P.W., Kooistra L. 2003. Assessment of heavy metal contamination in river floodplains by using the red-edge index. *The 3rd EARSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Herrsching, May 13–16, 2003. Herrsching, 2003, p. 173–179.
- Danner M., Locherer M., Hank T., Richter K. 2015. Spectral sampling with the ASD FieldSpec 4 – theory, measurement, problems, interpretation. *EnMAP Field Guides Technical Report*. Potsdam: GFZ Data Services, 2015. 25 p. doi: 10.2312/enmap.2015.008
- Dash J., Curran P.J. 2004. The MERIS terrestrial chlorophyll index. *Int. J. Remote Sens.* 25: 5403–5413.
- Dugin S., Sybirtseva O., Golubov S., Dorofey Y. 2019. Verification of multispectral data processing for the Sentinel-2A bands, field ASD FieldSpec® 3FR and UAV with the DJI STS-VIS. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 21: 29–39. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2019.21.147> (in Ukrainian).
- Earth Systems Change over Eastern Europe. (Co-editors P. Groisman, V. Lyalko). 2012. Kyiv: Akadempriodyka.
- Gao B.-C. 1996. NDWI. A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58: 257–266.
- Gitelson A., Merzlyak M.N. 1994. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves. Spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143: 286–292.
- Gomes V.P., Galvêncio J.D., Ferreira P.S., Silva J.F., Ferreira H.S. 2016. Hyperspectral analysis in areas of Caatinga degraded in the municipality of Sertânia – PE. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 6, 1: 262–269. doi:10.5935/1984-2295.20160111
- Harris A. 2008. Spectral reflectance and photosynthetic properties of Sphagnum mosses exposed to progressive drought. *Ecohydrology*, 1, 1: 35–42.
- Horler D.N.H., Dockray M., Barber J. 1983. The red edge of plant leaf reflectance. *Int. J. Remote Sens.* 4, 2: 273–288.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens. Environ.* 83 (1-2): 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Hunt E.R., Rock B.N. 1989. Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. *Remote Sens. Environ.*, 30 (1): 43–54.
- Lees K.J., Artz R.R., Khomik M. et al. 2020. Using spectral indices to estimate water content and GPP in Sphagnum moss and other peatland vegetation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 58, 7: 4547–4557. <https://centaur.reading.ac.uk/88076>
- Lyalko V., Zholobak G., Dugin S., Sybirtseva O., Golubov S., Dorofey Y., Polishchuk O. 2020. Experimental research of the carbon circle features in “atmosphere – vegetation” system over the wetland area within the forest – steep zone in Ukraine using remote spectro- and gasometry under the global climate changes. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 24: 15–23. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.24.166> (in Ukrainian).
- Lyalko V.I., Shportiuk Z.M., Sibirtseva O.M., Dugin S.S. 2014. Research of hyperspectral red edge indices for vegetation cover change detection over the oil field using spectrometric survey data. *Geologičnij žurnal*, 3 (348): 95–103 (in Ukrainian).
- Multispectral Methods of Earth Remote Sensing in Land Use Tasks*. (Eds. V.I. Lyalko and M.O. Popov). 2006. Kyiv: Naukova Dumka (in Ukrainian).

- Nebesny V.B., Grodzynska G.A., Samchuk A.L., Dugin S.S. 2020. Spectrophotometric express method of bioindication of park system. *Science and Innovation*, 16 (4): 74–82.
- Nebesnyi V.B., Grodzynska G.A., Samchuk A.I., Dugin S.S., and Honchar H.Yu. 2020. Spectrophotometric Express Method in Bioindication of Park Ecosystems. *Sci. Innov*, 16, 4: 74–82. <https://doi.org/10.15407/scine16.04.074>
- Penuelas J., Filella I., Gamon J.A. 1995. Assessment of photosynthetic radiation-use efficiency with spectral reflectance. *New Phytol.*, 131, 3: 291–296.
- Popov M., Stankevich S., Arkhipov A., Titarenko O. 2018. About possibility of hydrocarbon deposit remote detection using computer assistance. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 16: 34–40. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2018.16.119> (in Ukrainian).
- Räsänen A., Juutinen S., Kalacska M., Aurela M., Heikkinen P., Mäenpää K., Rimali A., Virtanen T. 2020. Peatland leaf-area index and biomass estimation with ultra-high resolution remote sensing. *GIScience and Remote Sens.*, 57, 7: 943–964. <https://doi.org/10.1080/15481603.2020.1829377>
- Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Deering D.W. 1973. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. *Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite Symposium*, Greenbelt, December 10-14, 1973. SP-351, 309-317.
- Sims D.A., Gamon J.A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sens. Environ*, 81, 2-3: 337–354.
- Snezhkin Yu.F., Korinchuk D.M. 2022. Peat – an Effective Alternative Fuel. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44, 3: 5–15 (in Ukrainian).
- Stankevich S.A. 2022. Accuracy of narrow-band spectral indices estimation by wide-band remote sensing data. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 9, 1: 4–7. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.209>
- Vdovichenko A.I. 2023. Peat as an Alternative High-Efficiency Ecological Energy Source at Local and Regional Levels. *Zhytomyr. Info*. [https://www.zhitomir.info/post\\_3104](https://www.zhitomir.info/post_3104) (in Ukrainian).
- Zatserkovny V.I., Oberetok N.V., Tishayev I.V., Nalyvayko O.M. 2017. Application of Geoinformation Technologies in Modeling Mineral Deposits. *Management of Complex Systems Development*, 30: 147–155 (in Ukrainian).

Received 12.09.2023

Received in revised form 28.10.2023

Accepted 08.12.2023

Про можливість визначення ознак торфовищ з використанням даних дистанційного зондування Землі

**В.І. Лялько**, С.С. Дугін\*, О.М. Сибірцева, Є.М. Дорофей, С.І. Голубов, Т.А. Орленко

ДУ «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України», Київ, Україна  
E-mail: Dstas2389333d@i.ua

\* Автор для кореспонденції

Враховуючи корисні властивості торфу як альтернативного джерела палива, проведено дослідження вегетаційних та водних індексів червоного краю, а також водних індексів, обчислених на основі спектрометрії наземного рослинного покриву над торфовищами. Досліди були виконані в Шацькому національному парку та на Бортиницькій станції аерації, що на лівому березі р. Дніпро. Досліди в Шацькому національному парку проведені за допомогою спектрорадіометра ASD FieldSpec 3FR (2010 р.) та супутникових зображень Sentinel-2 (2019 і 2021 рр.). Рослинність складалася переважно з осоки, з підтвердженням наявності торфу на цій території.

Були вивчені такі індекси, як REP, TCI та NDVI705, для класифікації наземного покриву на основі супутникових даних. Додатково використані інші вегетаційні індекси, а саме NDVI, EVI, SIPI, а також індекси, які вказують на вологість та фотосинтез рослин. Індекси NDVI та EVI надали цінні результати для визначення торфовищ. Модифікований хлорофільний індекс CLm обрахований для червоного краю спектра, аналогічно NDVI та EVI. Середнє значення індексу REP для тестових точок на обох територіях було подібним, що свідчить про можливу наявність торфовища. Аналіз даних також підтвердив ідентичність ознак торфовища на обох територіях. Висока кореляція індексів між цими територіями підтверджує цю ідентичність. Таким чином, вегетаційні індекси можуть бути використані для визначення меж торфовищ та ідентифікації осоки прибережної, яка є одним із індикаторів торфовищ.

**Ключові слова:** торф; дистанційне зондування Землі; супутникові зображення; спектральні індекси.