

# Деякі можливості застосування супутникових даних при моніторингу впливу на довкілля видобування титанових руд відкритим способом (на прикладі родовища Межирічне)

Руслан М. Шевчук , Володимир Є. Філіпович , Ганна М. Саранчук 

Державна установа “Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України”, вул. Олесь Гончара, 55-б, Київ, 01054, Україна

## Реферат

Оскільки, процес розробки родовищ титанових руд завжди супроводжується антропогенними змінами природних ландшафтів, це в свою чергу, призводить до ряду негативних екологічних наслідків. Відтак, постає необхідність проведення моніторингу гірничопромислових територій. У роботі представлено результати супутникового моніторингу території Межирічного родовища Іршанської групи розсипів, розробка якого триває уже понад 20 років. Оцінка екологічного стану включає оцінку стану лісів, факторів, що впливають на мікроклімат, та рівня забруднення оксидами і гідроксидами заліза. Для оцінки стану лісів були використані спектральні індекси NDVI, NDWI та індекс листової поверхні (LAI). Серед факторів, що впливають на мікроклімат, було проведено обрахунок значень поверхневого розподілу температур та евапотранспірації за моделлю Sebal. В результаті проведених досліджень було виявлено втрату води деревами на прилеглих до об'єктів гірничого відводу ділянках внаслідок перетоку ґрунтових вод до депресійних воронок, що формуються під впливом кар'єрного видобування ільменіту. Аналіз розподілу поверхневих температур і випаровування показав одночасне підвищення температури і зниження випаровування, що є сигналом негативних змін мікроклімату. Серйозного забруднення земної поверхні оксидами заліза не виявлено. Максимальні показники індексу окису заліза (IOR) приурочені до об'єктів гірничого відводу і, перш за все, до хвостосховищ. Загалом вплив відкритого видобування ільменіту на навколишнє середовище некритичний, що зумовлено використанням механічних методів збагачення руди. Головні зміни довкілля відбуваються у межах гірничого відводу, територія якого після закінчення розробки родовища підлягає обов'язковій рекультиватії. Подальші дослідження плануються проводити з залученням сучасних багатоспектральних супутникових даних та нових методів цифрової обробки інформації, в тому числі і наземної.

## Ключові слова

Супутниковий моніторинг, спектральні індекси, відкрите видобування корисних копалин, вплив на довкілля

Надійшла до редакції: 12 серпня 2021 / Прийнята: 20 грудня 2021/ Опублікована онлайн: 30 грудня 2021

## Satellite data application in environmental monitoring of ilmenite open-cast mining (case study of Mezhyrichne deposit)

Ruslan M. Shevchuk, Volodymyr E. Filipovych, Hanna M. Saranchuk

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

## Abstract

The development process of titanium ore deposits is always accompanied by anthropogenic changes in natural landscapes, which, in turn, leads to several negative environmental impacts. Therefore, it is necessary to monitor mining areas. This paper presents the results of satellite monitoring of the Mezhyrichne deposit territory of the Irshansk placers group, which has been developed for over 20 years. The assessment of the ecological state includes assessment of forests condition, factors impacting the microclimate and the level of pollution by iron oxides and hydroxides. Spectral indices NDVI, NDWI and leaf area index (LAI) were used to assess the condition of forests. Among the factors impacting the microclimate, values of surface temperature distribution and evapotranspiration according to the Sebal model were calculated. As a result of the study, water loss in trees was detected within adjacent areas to the mining concessions due to the groundwater flow into cones of depression, formed under the influence of quarrying. The analysis of surface temperature distribution and evapotranspiration showed a simultaneous increase in the first one and a decrease in the second one, which is a signal of negative changes in microclimate. No significant contamination of the earth's surface with iron oxides was detected. The maximum values of the iron oxide index (IOR) are associated with the mining concession objects especially the tailings. In general, the impact of open-pit mining of ilmenite on the environment is not critical, which is due to the use of mechanical methods of ore enrichment. The main changes of the environment take place within the mining concessions, which territory is subject to mandatory restoration after exploitation is stopped. Further research is planned to involve new modern multispectral satellite data and new methods of digital information processing in combination with ground truth measurements.

## Keywords

Satellite monitoring, spectral indices, open-cast mining, environmental impact

Received: 12 August 2021 / Accepted: 20 December 2021/ Published online: 30 December 2021

## Corresponding author:

Ruslan M. Shevchuk, Department of Aerospace Research in Geoecology, Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth NAS of Ukraine, 55-B, Oles Gonchar St, Kyiv, 01054, Ukraine  
Email: ruslancarse@gmail.com

© 2021 The Authors. Published by Taras Shevchenko National University of Kyiv. This is an open-access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. Вступ

Загальновідомо, що видобування та збагачення ільменіту завжди супроводжуються негативними змінами природних ландшафтів. При будівництві та експлуатації об'єктів в межах гірничого відводу (кар'єрів, хвостосховищ, відстійників, траншей) на значних територіях знімається ґрунтово-рослинний покрив, розкриваються водоносні горизонти, змінюється мікрорельєф поверхні за рахунок формування відвалів розкривних порід. Це, в свою чергу, часто призводить до негативних змін у навколишньому природному середовищі, таких як забруднення ґрунтових та поверхневих вод, посилення водної та вітрової ерозії, зміни мікроклімату гірничопромислових територій, деградації ґрунтів та лісових насаджень на прилеглих територіях. Відтак, задля мінімізації негативного впливу на природу необхідно постійно проводити екологічний моніторинг територій видобування. Значну частину інформації про якісні показники навколишнього середовища можна отримати шляхом обробки та дешифрування матеріалів космічної зйомки, перевагами якої є не лише відносна дешевизна, а й одночасне охоплення великих площ земної поверхні (в тому числі недоступної для проведення наземних вимірювань) та можливість проведення досліджень у ретроспективі.

## 2. Вихідні дані

Для досліджень було вибрано ділянку родовища Межирічне, що територіально розташоване в межах колишнього Хоросівського і нинішнього Житомирського

районів Житомирської області поблизу селищ Іршанськ та Нова Борова (рис. 1). Згідно даних ДНВП “Геоінформ” (<http://geoinf.kiev.ua/>) розробка родовища почалася у 2000 р., тому для оцінки впливу видобування на довкілля було використано супутникові знімки Landsat за серпень 1991, 2001 та 2020 р., тобто до початку видобування, відразу після початку та після майже 20 років інтенсивної гірничої діяльності. Знімки постачаються Геологічною службою США (<https://www.usgs.gov/>) з готовими атмосферною корекцією та радіометричним калібруванням.

## 3. Методи дослідження

Для вивчення впливу видобування ільменіту на довкілля було здійснено оцінку стану рослинності, зокрема лісового покриву, оцінку показників, що впливають на мікроклімат та оцінку забруднення земної поверхні окисами заліза.

Для оцінки стану рослинності за даними супутникової зйомки були використані такі спектральні індекси як нормалізований диференційний вегетаційний індекс (NDVI), нормалізований диференційний водний індекс (NDWI) та індекс листової поверхні (LAI). Контури лісових насаджень визначалися на основі контрольованої класифікації за методом опорних векторів (SVM), яка наразі вважається найбільш точною серед існуючих.

Індекс NDVI є найпоширенішим серед групи вегетаційних індексів і відображає щільність рослинності у пікселі. Його фізична суть визначається особливостями процесу фотосинтезу: максимальним поглинанням хлорофілом сонячної радіації у видимому діапазоні

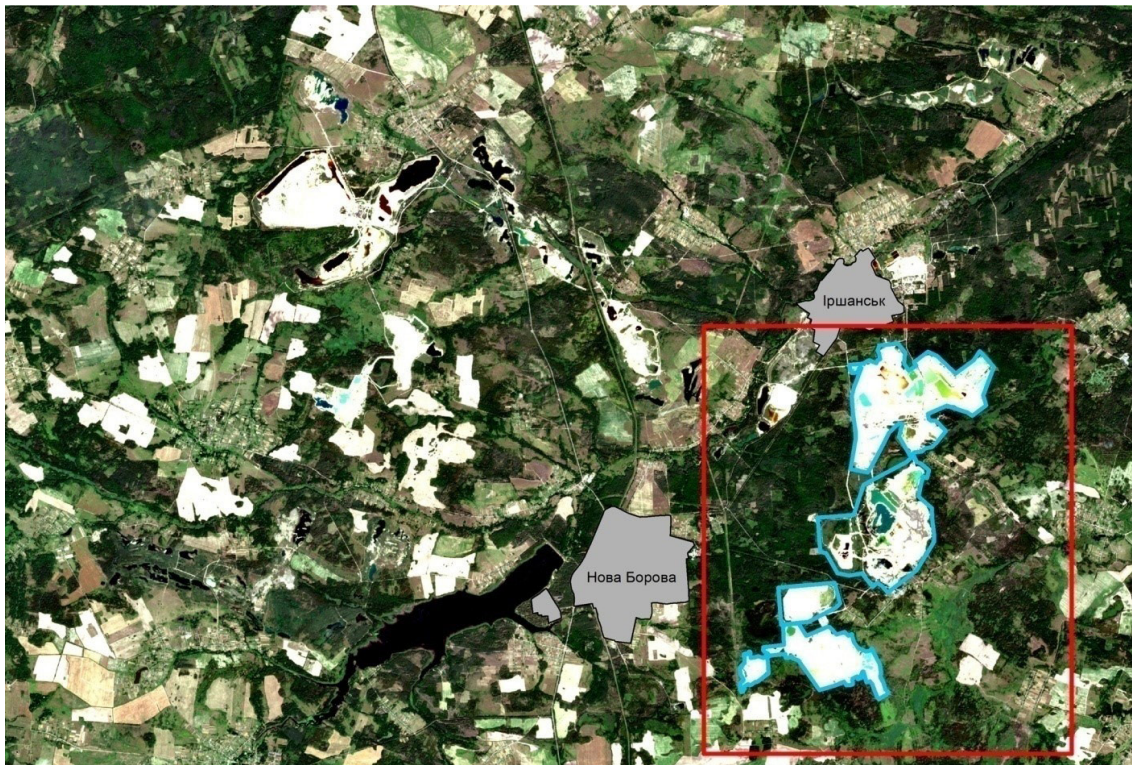


Рис. 1. Карта розташування дослідної ділянки. Основа – супутниковий знімок Sentinel 2A. Синім кольором виділено межі гірничого відводу.  
Fig. 1. Map of study site. Base map – Sentinel 2A satellite image. Mining concession boundaries marked as blue.

спектру і відбиттям в інфрачервоному. Відтак, індекс є співвідношенням відбиття у червоному (RED) діапазоні електромагнітного спектру до ближнього інфрачервоного (NIR) діапазону і обчислюється за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

Іншими словами індекс відображає кількість фотосинтетично активної біомаси.

Індекс NDWI має дві варіації: перша запропонована Гао (Gao, 1996) і відображає якісні показники вмісту води в листках рослин, друга запропонована МакФітерс (McFeeters, 1996), відображає кількість води у водних об'єктах. Нами використовувався перший варіант, який є співвідношенням відбиття в різних ділянках інфрачервоного діапазону спектру:

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

Застосування індексу базується на припущенні, що в результаті розробки родовища, вміст води в листі дерев які знаходяться в безпосередній близькості до об'єктів гірничого відводу має зменшитися. Справа в тому, що процесі видобування ільменіту порушуються (краще зазнають змін) водоносні горизонти, вода відкачується з кар'єрів та ставків і подається на гідромонітор, що призводить до формування депресійних воронок і, як наслідок, зменшення кількості вологи у ґрунті.

Важливим показником фотосинтетичної активності є також LAI введений Ватсоном (Watson, 1947) у минулому столітті. Індекс має чітку геометричну інтерпретацію і є цінним показником морфоструктурних параметрів рослинних екосистем. По суті він відображає відношення площі освітленого листя до площі земної поверхні під ними і може бути фізично виражений як м<sup>2</sup>/м<sup>2</sup>, хоча формально це величина безрозмірна. Між рядом вегетаційних індексів (NDVI, SAVI, EVI) та LAI існує регресійна залежність, тому існують різні методи обрахунку останнього, в наших дослідженнях використано наступну формулу, запропоновану (Saito et al., 2001):

$$LAI = 0.57 \cdot \exp(2.33 \cdot NDVI) \quad (3)$$

Оцінка впливу видобування на мікроклімат здійснювалася шляхом обрахунку величин, що залежать від термофізичних властивостей земної поверхні – температури та випаровування.

Зміна поверхневого розподілу температур об'єктів земної поверхні зумовлена заміщенням ґрунтового-рослинного покриву розкритими породами, переважно кварцовим піском. Оскільки питома масова ізобарна теплоємність кварцу відносно невелика (0.8 кДж/(кг\*К)), пісок швидко нагрівається в денний час і нагріває повітря підвищуючи його температуру, що гіпотетично може негативно відобразитися на стані рослинного покриву прилеглих територій.

Обрахунок температури земної поверхні на основі матеріалів космічної зйомки здійснюється через обернену

формулу Планка:

$$T = \frac{C_2}{\lambda \ln \left( \frac{\epsilon(\lambda) c_1}{\lambda^5 L_s} + 1 \right)} \quad (4)$$

де  $L_s$  – спектральна густина енергетичної яскравості земної поверхні,  $\epsilon(\lambda)$  – спектральний коефіцієнт теплового випромінювання,  $c_1 = 2hc^2 = 1,191 \cdot 10^{-16}$  Вт·м<sup>2</sup> і  $c_2 = \frac{hc}{k} = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К – перша і друга константи закону Планка,  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Дж·с – постійна Планка,  $c = 2,998 \cdot 10^8$  м/с – швидкість світла у вакуумі,  $\lambda$  – довжина хвилі електромагнітного випромінювання.

Вищенаведене рівняння містить дві невідомі залежні між собою змінні, це власне температура та коефіцієнт теплового випромінювання. Розрахунок останньої проводився через NDVI, що також за необхідності дає можливість підвищити розрізнення вихідного зображення, шляхом використання даних видимого діапазону отриманих іншим сенсором (Shevchuk, 2018).

Важливість обрахунку значення випаровування зумовлена ендотермічним процесом, тобто випаровування є природним охолоджувачем, що варто враховувати при оцінці впливу видобування на мікроклімат.

У основу розрахунку величини випаровування за даними супутникової зйомки покладене рівняння Пенмана-Монтейна:

$$ET_0 = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho \cdot C_p \cdot (\delta e) \cdot ga}{(\Delta + \gamma (1 + \frac{g_a}{g_s})) + L_v} \quad (5)$$

де,  $L_v$  – об'ємна прихована теплота випаровування (2453 МДж/м<sup>3</sup>),  $ET_0$  – об'єм води, що випаровується (мм/с),  $\Delta$  – швидкість зміни питомої вологості в залежності від температури повітря (Па К<sup>-1</sup>),  $R_n$  – радіаційний баланс (Вт/м<sup>2</sup>),  $G$  – потік тепла в землю (Вт/м<sup>2</sup>),  $C_p$  – питома теплоємність повітря (1004 Дж/кг/К),  $\rho$  – щільність сухого повітря (кг/м<sup>3</sup>),  $\delta e$  – дефіцит тиску пари (Па),  $g_a$  – атмосферна провідність (м/с),  $g_s$  – провідність поверхні (м/с),  $\gamma$  – психрометрична стала ( $\approx 0.066$  кПа/°С)

Наразі існує кілька алгоритмів розрахунку евапотранспірації за даними ДЗЗ, серед яких найвідомішими є: SEBAL (The Surface Energy Balance Algorithm for Land), SSEB (Simplified Surface Energy Balance) та METRIC (Mapping Evapotranspiration at high Resolution with Internalized Calibration). У нашому дослідженні використано SEBAL вперше описаний Бастіансеном (Bastiaanssen et al., 1998). Слід відзначити, що розрахунок показників випаровування вимагає не лише наявності даних космічної зйомки, а й даних наземних метеорологічних вимірювань.

Коефіцієнт окису заліза (IOR) є простим відношенням значень відбиття червоного діапазону спектру до синього. Залістисті сполуки поглинають електромагнітне випромінювання у синьому діапазоні та відбивають у червоному, тому ділянки з їх вмістом матимуть вищі показники IOR (Segal, 1982). Залізо входить до складу

ільменіту (Fe, Mg, Mn)  $TiO_3$ ) і при його видобуванні та збагаченні оксиди та гідроксиди заліза осідають на поверхні хвостосховищ, звідки можуть розмиватися і транспортуватись в навколишні ландшафти. Ефективність застосування IOR для територій видобування титанових руд підтверджена попередніми дослідженнями авторів.

#### 4. Результати

Результати досліджень показали що показники індексу NDVI та LAI на дослідженій території не знизилися, а навпаки зросли (рис. 2, 3). Проте збільшення кількості фотосинтетично активної біомаси радше зумовлена не відсутністю негативного впливу видобування, а особливостями господарювання на цій території. У радянські часи значна частина земель осушувалася та розорювалася, але з настанням незалежності і переходом на ринкову модель економіки очевидною стала нерентабельність ведення сільського господарства через низьку родючість піщаних ґрунтів, які тут переважають.

Відтак, ці землі почали заростати лісом, що добре простежується на супутникових знімках. Крім того, за майже тридцятирічний період велика частина дерев перейшли на більш пізні етапи онтогенезу (наприклад, з ювенільного та віргінільного на репродуктивний), що також відобразилося на активності процесів фотосинтезу.

Що стосується нормалізованого диференційного водного індексу, то тут варто відмітити поступове зниження його показників кожного наступного етапу спостережень. Особливо критичною є ситуація на деяких ділянках, прилеглих до об'єктів гірничого відводу (рис. 4), де значення індексу спадають нижче 0.3, що свідчить про серйозний дефіцит води в листі дерев імовірно викликаний відтоком ґрунтових вод до депресійних воронки, що формуються під впливом кар'єрного видобування ільменіту. На дефіцит води також вказує низьке значення випаровування з поверхні їхніх крон (рис. 5).

Постійна зміна характеру земних покривів не могла не відобразитися на мікрокліматичних показниках. Так, середні температури земної поверхні збільшилися

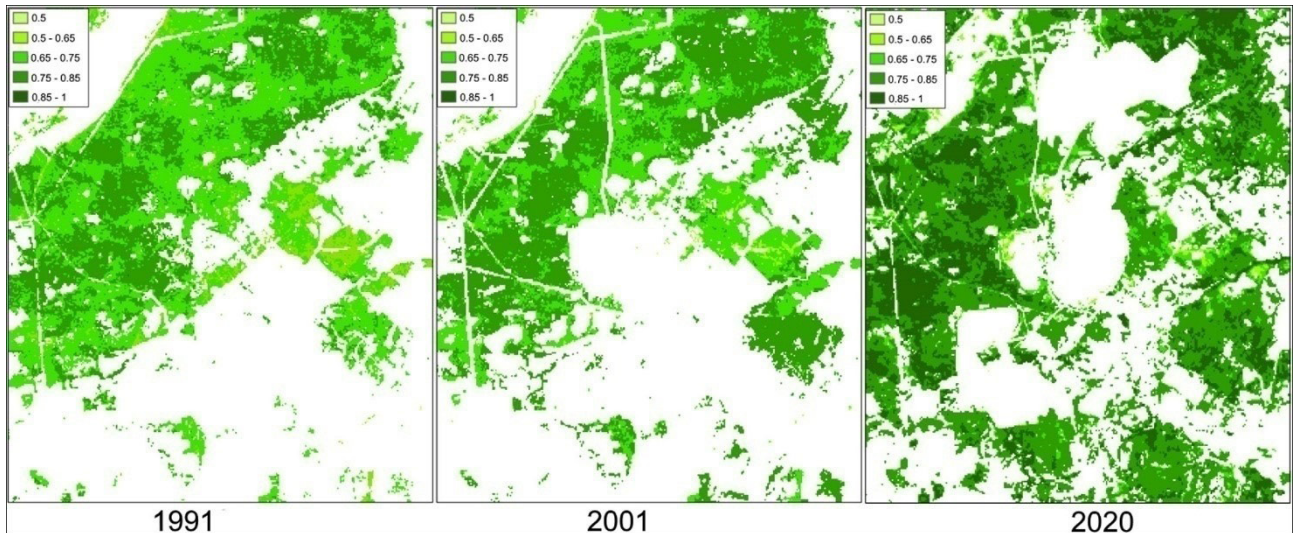


Рис. 2. Карти розподілу значень індексу NDVI в межах лісових насаджень.  
Fig. 2. NDVI values distribution within forested areas.

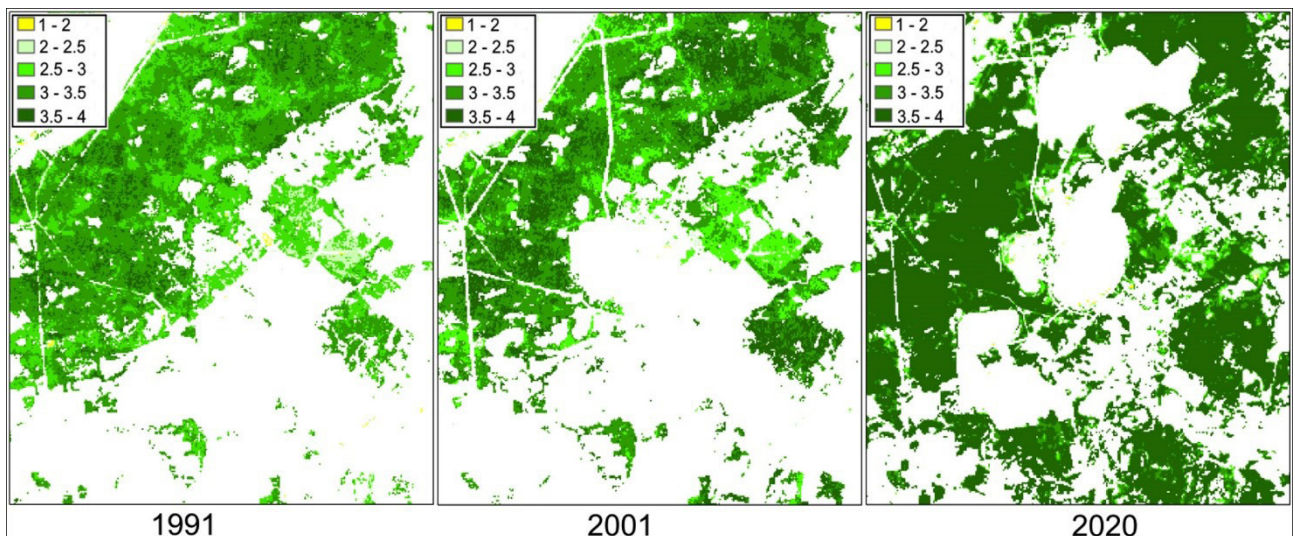


Рис. 3. Карта розподілу значень індексу LAI в межах лісових насаджень.  
Fig. 3. LAI values distribution within forested areas

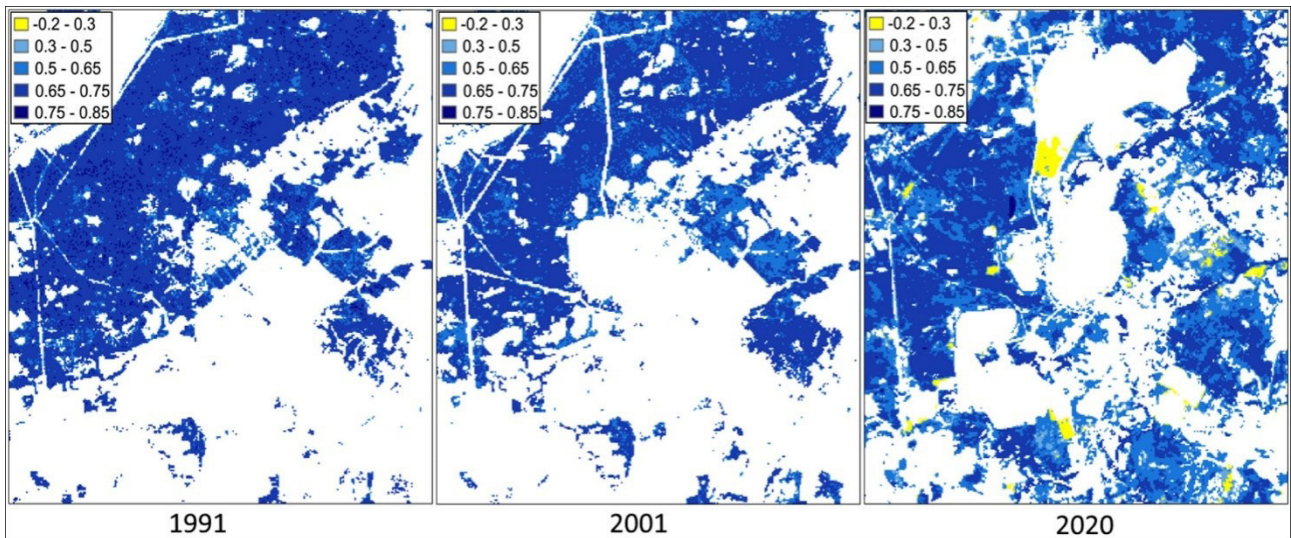


Рис. 4. Карта розподілу значень індексу NDWI в межах лісових насаджень.  
 Fig. 4. NDWI values distribution within forested areas.

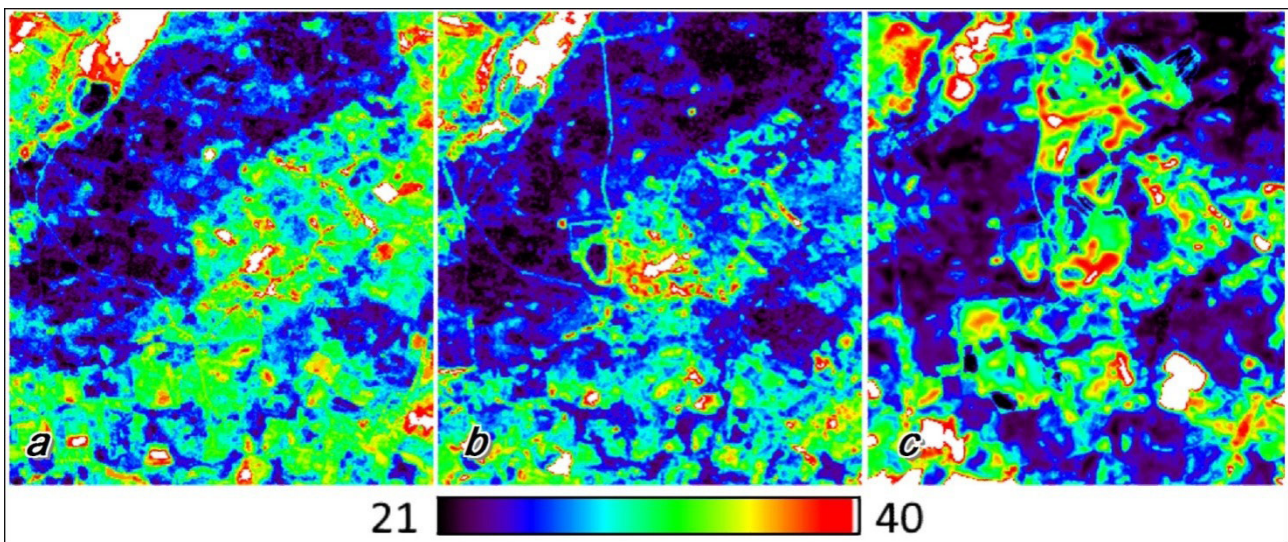


Рис. 5. Карты розподілу температур земної поверхні (°C) на досліджуваній ділянці. а – 1991 р.; б – 2001 р.; с – 2020 р.  
 Fig. 5. Surface temperature distribution (°C) of study area. Years of survey (left to right): 1991, 2001 and 2020.

з 25,1°C у серпні 1991 р. до 27,9 °C того ж місяця 2020 року. Середні значення випаровування навпаки трохи зменшились, що є логічним, зважаючи на зменшення вмісту води у листі, проте слід додати, що для обчислень використовувалися метеорологічні дані Коростенської метеостанції, яка розташована за 25 км на північний захід від досліджуваної ділянки. Тому, отримання більш точних результатів вимагає залучення максимально можливих об'ємів супутникової та наземної інформації, що й планується зробити у майбутньому. В цілому одночасне підвищення температури і зниження випаровування є сигналом негативних змін мікроклімату. Особливості поверхневого розподілу температур та евапотранспірації в роки спостереження представлені на рис. 5 і 6.

Серйозного забруднення території окисами заліза (рис. 7) не виявлено. Максимальні показники IOR приурочені до об'єктів гірничого відводу і на окремих ділянках за його межами.

## 5. Висновки

На основі аналізу даних супутникового моніторингу території Межирічного родовища ільменіту протягом останніх 30 років суттєвих негативних змін довкілля за межами гірничого відводу не виявлено. На основі цифрової обробки багатоспектральних космічних даних проведено оцінювання, стану лісової рослинності (індекси NDVI, NDWI та LAI), та отримано оцінку показників, що впливають на мікроклімат місцевості (поверхнева температура, випаровування), а також – оцінку забруднення земної поверхні окисами заліза. За період спостереження (1991–2020 рр.) показники індексів NDVI та LAI зросли, що вказує на збільшення кількості фотосинтетично активної біомаси. Причина такого явища, на наш погляд, зумовлена не відсутністю негативного впливу видобування, а особливостями ведення господарської діяльності на цій території.

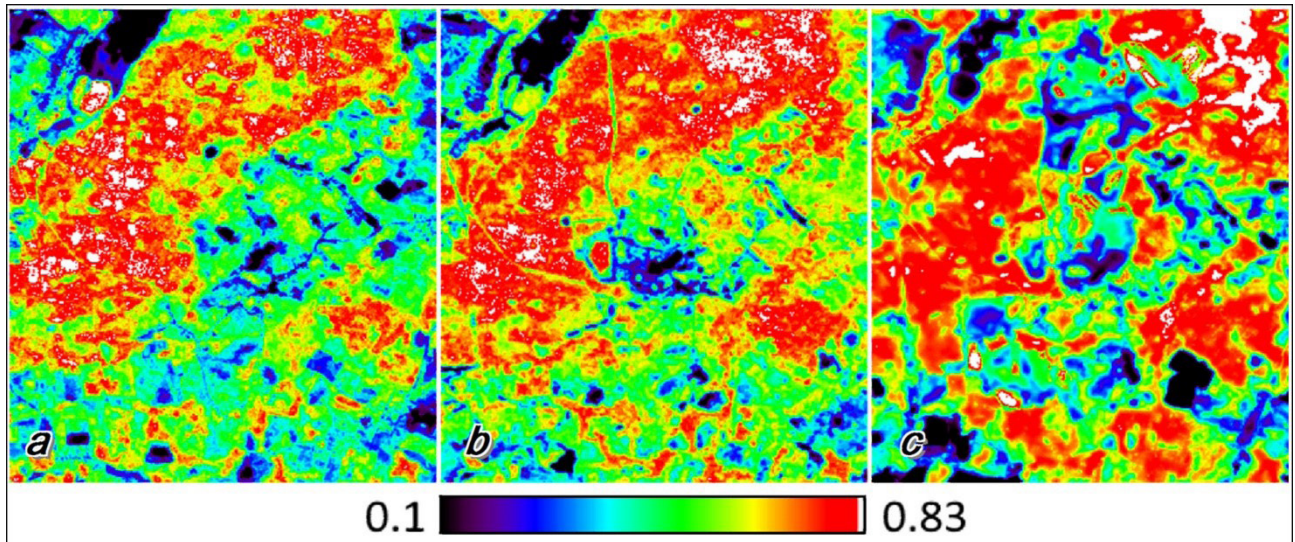


Рис. 6. Карти розподілу значень евапотранспірації (мм/год) на досліджуваній ділянці. а – 1991 р.; б – 2001 р.; с – 2020 р.  
 Fig. 6. Evapotranspiration values distribution (mm/h) of study area. Years of survey (left to right): 1991, 2001 and 2020.

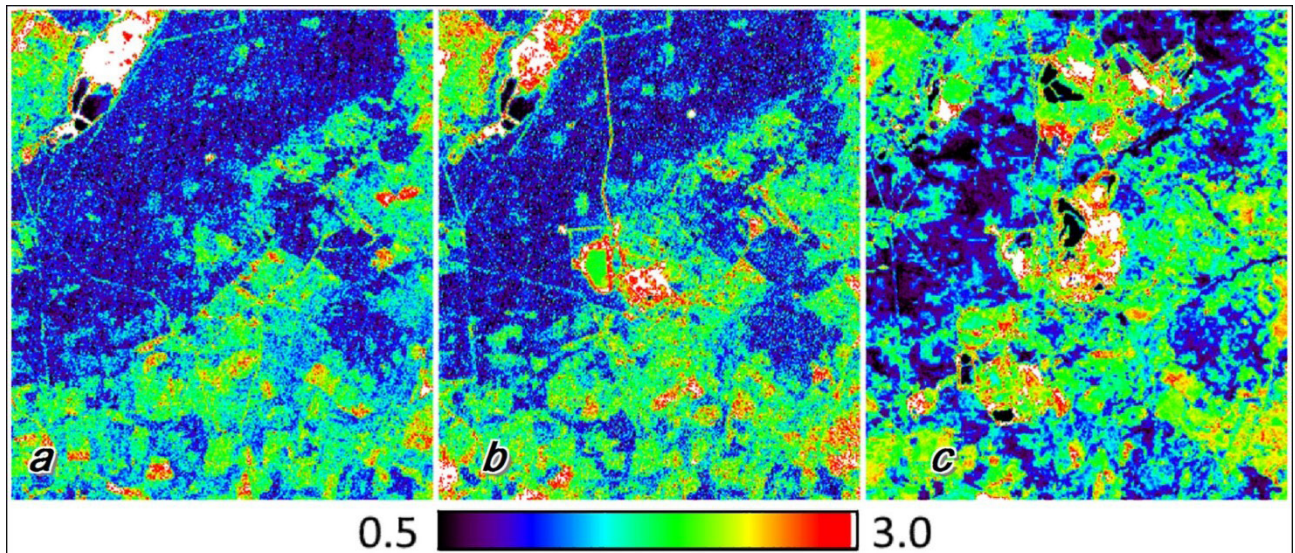





Рис. 7. Карти розподілу коефіцієнта окису заліза на досліджуваній ділянці. а – 1991 р.; б – 2001 р.; с – 2020 р.  
 Fig. 7. Iron oxide ratio distribution of study area. Years of survey (left to right): 1991, 2001 and 2020.

Вплив видобування титанових руд на довкілля проявився за даними NDWI в поступовому зниженні його показників з кожним наступним етапом спостережень. На окремих ділянках, прилеглих до гірничого відводу, спостерігається критична ситуація серйозного дефіциту води в рослинності, що безперечно викликана відтоком ґрунтових вод до депресійних воронки, що формуються під впливом кар'єрного видобування. Аналіз розподілу поверхневих температур і випаровування показав одночасне підвищення температури і зниження випаровування, що є сигналом негативних змін мікроклімату. Отримані результати не дають підстав стверджувати про значне забруднення території окисами заліза. Максимальні показники IOR приурочені до об'єктів гірничого відводу і, перш за все, до хвостосховищ. За межами гірничого відводу спостерігається також збільшення показників IOR, але на сьогоднішній день не критичне. Зауважимо, що Межирічне родовище

розробляється і поки що відпрацьовані ділянки не рекультивуються. Є підстави для упевненості, що результати даних представлених і наступних досліджень допоможуть при визначенні першочергових об'єктів рекультивації порушених земель. Подальші дослідження планується проводити з залученням ширшого переліку багатоспектральних супутникових даних та збільшенням арсеналу методів цифрової обробки інформації, в тому числі і наземної.

#### ORCID ID

Ruslan Shevchuk  <https://orcid.org/0000-0001-6610-4927>  
 Volodymyr Filipovych  <http://orcid.org/0000-0002-9404-8122>  
 Hanna Saranchuk  <https://orcid.org/0000-0002-8147-9708>

**Список посилань**

Bastiaanssen, W. G. M., M. Menenti, R. Feddes, A., Holtslag, A. M. (1998). The surface energy balance algorithm for land (SEBAL): Part 1 formulation. *Journal of Hydrology*, 212–213, 198–212.

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.

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.

Saito, K., Ogawa, S., Aihara, M., Otowa, K. (2001) Estimates of LAI for forest management in Okutama. *Proceedings of the*

*22nd Asian Conference on Remote Sensing*, 5-9 November 2001, Singapore. Vol. 1, 600–605

Segal, D. (1982). Theoretical Basis for Differentiation of Ferric-Iron Bearing Minerals, Using Landsat MSS Data. *Proceedings of Symposium for Remote Sensing of Environment, 2nd Thematic Conference on Remote Sensing for Exploratory Geology*, Fort Worth, TX, 949–951

Shevchuk, R. (2018) Technique for Satellite Monitoring of Illegal Amber Mining Territories Based on Integrated Landsat and Sentinel Data Processing. *Journal of the Georgian Geophysical Society*, 21(1), 26–32.

Watson, D.J. (1947) Comparative physiological studies in the growth of field crops. Variation in net assimilation rate and leaf areas between species and varieties, and within and between years. *Annals of Botany*, 11, 41–76.