

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ РЯДІВ СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ СТАНУ ЛІСІВ

Гордійко Наталія Олександрівна

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,

orcid: 0000-0002-0925-5160

natalygor22@gmail.com

Яйлимова Ганна Олексіївна

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА України,

orcid: 0000-0001-6116-8294

anna.yailymova@gmail.com

Системи на основі сучасних інтелектуальних технологій сенсорного та супутникового моніторингу здатні відстежувати та контролювати віддалені території навколишнього середовища в реальному часі та сприяють швидкому реагуванню на його зміни, перш ніж це стане проблемою. Вони дозволяють ефективніше використовувати наявні ресурси, оскільки дані можна відстежувати та контролювати віддалено, без необхідності фізичного доступу. Сучасні супутникові датчики дозволяють отримати зображення об'єктів земної поверхні з високою роздільною здатністю, що дозволяє створювати детальні карти навколишнього середовища Землі та робить космічний моніторинг потужним та ефективним інструментом як аналізу кліматичних змін, екологічних катастроф та глобального впливу людської діяльності на стан екосистем, так і їхнього попередження. В даній роботі досліджуються та визначаються найбільш інформативні спектральні канали супутника Sentinel-2 з метою їхнього подальшого аналізу в процесі супутникового моніторингу пошкоджених лісів. Сформовано дослідницький набір даних безхмарних супутникових знімків (тестового датасету (набору даних) по території Франції) у вигляді часового ряду супутникових знімків для дистанційного моніторингу лісових ділянок (до та після пошкодження). Отриманий набір безхмарних супутникових знімків складається з 5573 зображень. На прикладі вегетаційного індексу NDVI перевірена гіпотеза щодо зменшення його середнього значення та зростання його стандартного відхилення при появі на певній ділянці хвойного лісу пошкодження (захворювання чи засихання). Отримані результати можуть використовуватися при машинному навчанні алгоритмів класифікації пошкоджених лісів. Дослідження проводилось відповідно до наукових цілей європейського проєкту «Satellites for Wilderness Inspection and Forest Threat Tracking» (SWIFTT).

Ключові слова: сенсори, спектральні канали, Sentinel-2, аналіз супутникових даних, інтелектуальні технології сенсорного моніторингу довкілля, виявлення змін у стані лісів.

Вступ

Залежно від типу встановлених на супутниках сенсорів, отримані зображення мають різні характеристики, що сприяє використанню різних типів спектральних характеристик для моніторингу об'єктів земного покриву [1].

Супутник Sentinel-2 обладнаний оптико-електронним мультиспектральним інструментом MultiSpectral Instrument (MSI) на основі датчика [2, 3] для зйомок з роздільною здатністю від 10 до 60 м у видимій і ближній інфрачервоній Visible and Near-Infra-Red (VNIR) та короткохвильовій інфрачервоній Short Wavelength Infrared (SWIR) зонах спектру випромінювання, що включає 13 спектральних каналів [3, 4], завдяки чому він надає інструмент для моніторингу змін у стані рослинності, визначення міри її пошкодження або захворювання (зокрема, виявлення впливу лісових шкідників, пожеж [5] тощо). Це обумовлено тим, що в оптичному діапазоні, що поєднує видиму, ближню інфрачервону та середню інфрачервону області, відбита сонячна радіація несе в собі інформацію здебільшого про біохімічні процеси об'єктів земної поверхні.

При дистанційному зондуванні вбудований в MSI спеціальний датчик дає можливість обирати певні спектральні смуги для використання в методах класифікації зображень. Виходить, що при класифікації дистанційного зондування існує вища ймовірність автоматичного виявлення цікавих нам об'єктів з певними спектральними ознаками (пошкоджених ділянок). Важливо також вміти коректно відокремити вирубку лісу [6] від його захворювання. У випадку з вирубками зміна спектральних характеристик відбувається за короткий термін, на відміну від процесу усихання та захворювання лісів, що може тривати від кількох місяців до років.

Досліджувана територія та формування набору даних

Для дослідження пошкоджених лісів тестовою територією слугувала східна Франція (рис. 1), яка складається з 93 прямокутників, в межах яких містяться різні типи земного покриву, зокрема хвойний та листяний ліси.

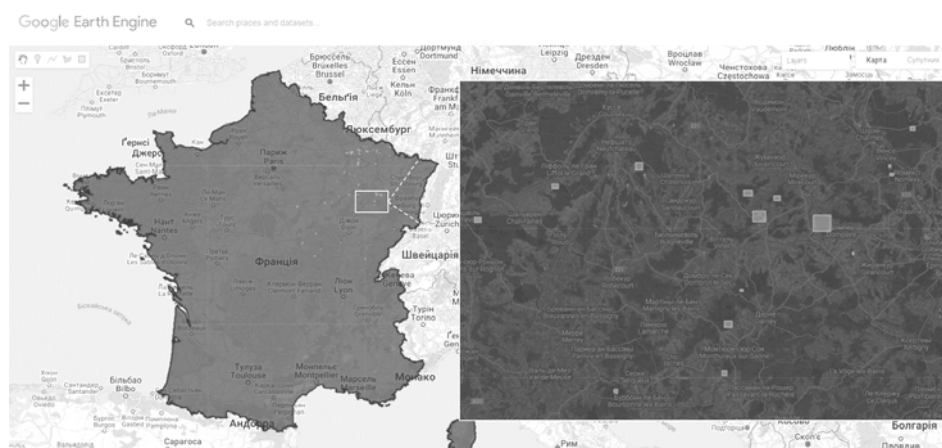


Рис. 1

Для дослідження динаміки процесу пошкодження лісу шкідниками у часі слід враховувати погодні умови над досліджуваною територією. Оскільки Sentinel-2 належить до космічних апаратів з пасивним сенсором [7], датчик MSI

якого реєструє лише відбите від землі сонячне випромінювання, що не проходить через хмари, для підвищення достовірності дослідження при формуванні каталогу супутникових даних проведений попередній візуальний аналіз даних дистанційного моніторингу (зображень, отриманих супутником Sentinel-2) на безхмарність.

Аналіз ґрунтувався на такому принципі визначення відмінності хмари від інших об'єктів: якщо поряд з білим об'єктом (гіпотетичною хмарою) бачимо аналогічний за формою темний об'єкт (тінь), можемо інтерпретувати його як хмару. За таким принципом можна відрізнити на зображенні темні тіні від темної за кольором води. Або якщо на білий об'єкт (гіпотетичну хмару) ніби накладається частина ділянки — теж вважаємо його хмарою. На рис. 2 наведена одна з тестових ділянок — з ідентифікованою хмарою (а) та без неї (б).

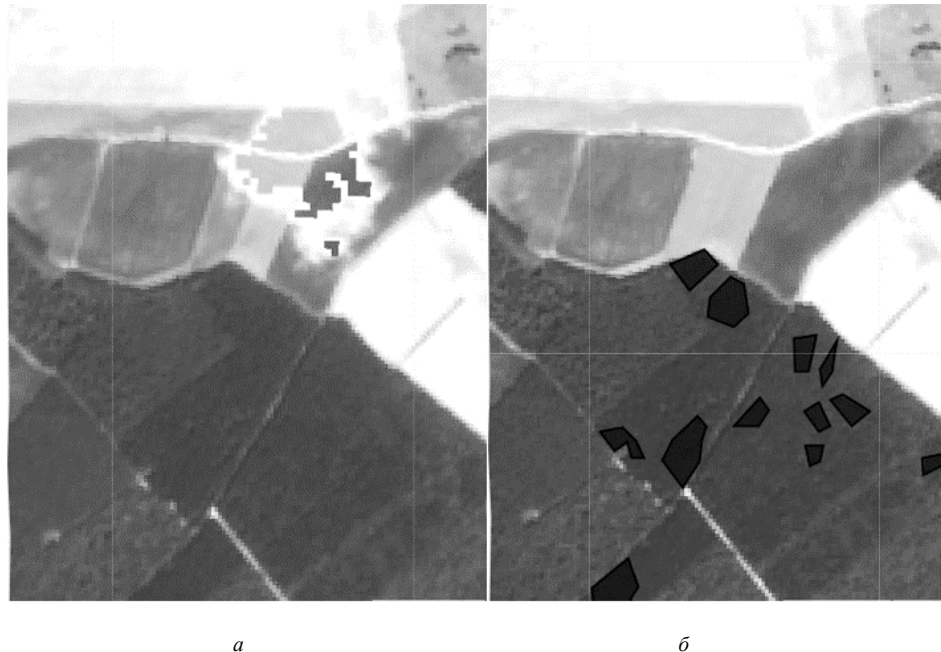


Рис. 2

Ґрунтуючись на інформації про тестові території та надані маски лісових пошкоджень, визначено дати безхмарних супутникових даних для кожної досліджуваної області лісу за 2017–2021/22 рр. (за рік до та три-чотири роки після дати пошкодження для відслідковування подальшої динаміки лісу).

Залежно від дати пошкодження завантажені безхмарні супутникові дані для тестових лісових масивів. Завантаження даних проводилось за допомогою коду, написаного у хмарній платформі Google Earth Engine [7–9]. Таким чином, створено каталог для навчання моделі нейронної мережі при виявленні пошкоджень лісів у Франції з такою структурою назви: «geojson_31-YYYY-MM-DD-uuuu-mm-dd-S2.tif», де geojson_31 є міткою області, якій відповідає супутниковий знімок; YYYY-MM-DD — початок (YYYY — рік, MM — місяць, DD — число) ; та uuuu-mm-dd — кінець (uuuu — рік, mm — місяць, dd — число) періоду, протягом якого завантажено супутникові дані; S2 — назва супутника, з якого отримані дані (Sentinel-2). Дослідницький набір даних безхмарних супутникових знімків складається з 5573 зображень 79 тестових ділянок за 2017–2022 рр.

Аналіз спектральних каналів Sentinel-2

У даному дослідженні проаналізовано смуги пропускання (спектральні канали) супутника Sentinel-2 (рис. 3) [10] на виявлення найбільш пошкоджених ділянок хвойних лісів на сході Франції. Враховувалося, що на лісових ділянках, які зазнають впливу шкідників, порушено біохімічні процеси, що характеризується зменшенням вмісту води, інтенсивності поглинання хлорофілу та біомаси через наявний стрес.

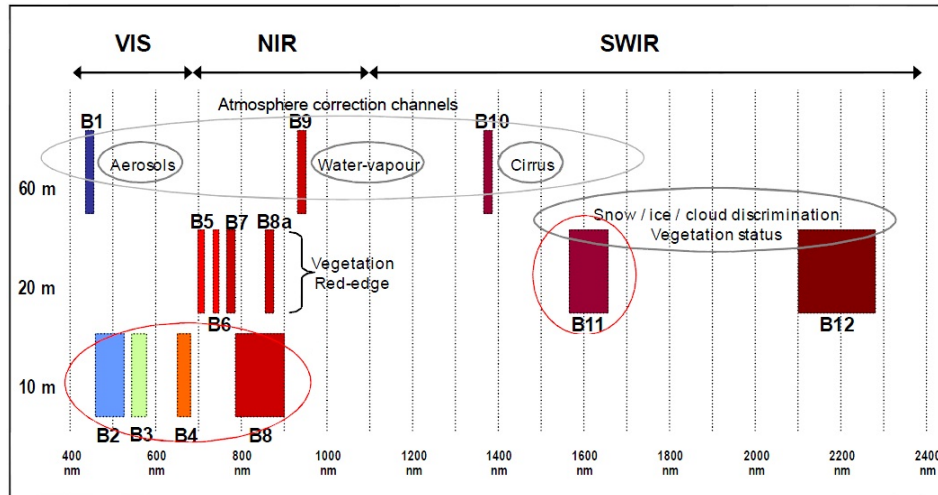


Рис. 3

«Жовтий спектр» (550–650 nm) характеризує «жовтизну» певного об'єкта, тобто може виявляти стрес лісових ділянок зі шкідниками у кронах дерев. У ближньому інфрачервоному діапазоні 1 NIR-1 (760–900 nm, канал) здорові рослини відбивають більше енергії, тому коефіцієнт відбиття ближнього інфрачервоного діапазону є одним з найпотужніших способів класифікації здорової рослинності та вмісту її біомаси: внутрішня структура здорового хлорофілу добре відбиває ближнє інфрачервоне випромінювання. Якщо рослини в'януть та/або гинуть, відгук ближнього інфрачервоного діапазону зменшується. Між ближнім інфрачервоним 2 NIR-2 (860–1040 nm) та ближнім інфрачервоним 1 діапазонами є значне перекриття. Основна відмінність між двома діапазонами полягає в тому, що діапазон ближнього інфрачервоного діапазону 2 менше підпадає під вплив атмосфери. Тому при дослідженні рослинності ближній інфрачервоний діапазон 2 забезпечує більш складний аналіз рослинності та дослідження біомаси, оскільки менш чутливий до атмосферних впливів.

Вода має набагато сильніше поглинання у SWIR. На відбиття короткохвильового інфрачервоного випромінювання впливає вміст води в зеленій масі дерев, що робить його корисним для аналізу водного стресу дерев. Короткохвильове інфрачервоне випромінювання 1 SWIR-1 (1570–1650 nm) краще проникає крізь хмари, ніж випромінювання видимих смуг, і тому чутливе до вмісту води в рослинності. Відбивна здатність зменшується зі збільшенням вмісту води. Короткохвильовий інфрачервоний діапазон 2 SWIR-2 (2080–2350 nm) схожий на SWIR-1 та також чутливий до змін вологості рослин, до того ж за нього хмари виглядають темнішими.

У таблиці наведено спектральні канали Sentinel-2 та приклад їх відображення у чорно-білій палітрі досліджуваної пошкодженої ділянки лісу Франції (рис. 4).

Таблиця

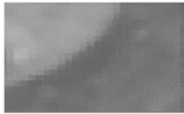
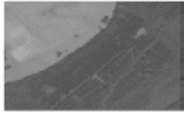
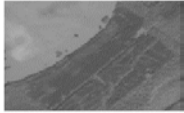
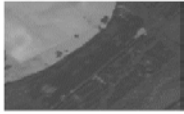
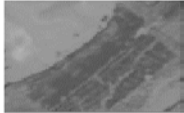
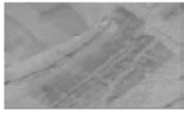
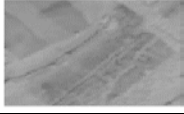
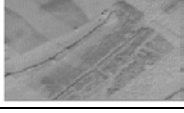
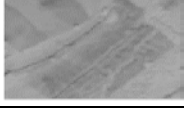
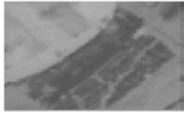
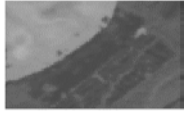
Спектральні канали	Просторове розділення, м	Спектральний діапазон, нм	Супутникове зображення досліджуваної ділянки
B1 Узбережний аерозоль	60	443	
B2 Синій	10	490	
B3 Зелений	10	560	
B4 Червоний	10	665	
B5 Червоний край рослинності	20	705	
B6 Червоний край рослинності	20	740	
B7 Червоний край рослинності	20	783	
B8 Інфрачервоний (NIR)	10	842	
B8a Вузький інфрачервоний (NIR)	20	865	
B9 Водяна пара	60	940	
B10 Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR)	60	1375	Пір'ясті хмари (канал для моніторингу лісів не розглядався)
B11 Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR)	20	1610	
B12 Короткохвильовий інфрачервоний (SWIR)	20	2190	



Рис. 4

Виходячи із зазначеного вище, для виявлення пошкоджених шкідниками лісових ділянок з 13 спектральних каналів для подальшого дослідження запропоновано аналізувати дані, отримані з NIR- та 2 SWIR-каналів Sentinel-2: B8 (842 нм), B11 (1610 нм) та B12 (2190 нм), що відповідають ближній та середній інфрачервоній області спектру випромінювання. Крім того, для уточнення пропонується аналізувати також канал B4 (665 нм), оскільки він характеризує міру «жовтизни». Ці канали пропонується застосовувати для підвищення інформативності застосування розрахованих за ними вегетаційних індексів [11], а саме: NDVI [12], NGRDI [13], NDWI2 [14], RDI [15], NDRE2 [16], DRS [17], GLI [18], NDWI [19], DSWI [20], NDII [21].

При дослідженні проведений експеримент, в якому припускається, що при появі на певній ділянці хвойного лісу пошкодження (захворювання) зменшується середнє значення вегетаційного індексу (на прикладі NDVI), а також зростає стандартне відхилення.

На рис. 5 наведені зображення вегетаційного індексу NDVI в часі (2017-04-21–2021-11-21) для однієї з тестових територій. Світло-сірим кольором позначені ділянки з високим значенням NDVI, а темно-сірим — ділянки, які мають порівняно низькі значення відносно загальної більшості.



Рис. 5

На рис. 6 наведено графік порівнянь середніх значень та стандартних відхилень для кожного проміжку часу. Отже, в 2017 р. та в першій половині 2018 р. середні значення NDVI для досліджуваної ділянки лісу були високими, а стандартні відхилення — невеликими. Аналізуючи показники середнього значення стандартного відхилення NDVI у часі, можна робити висновки щодо наявності змін у лісовому покриві за кожну наступну дату.

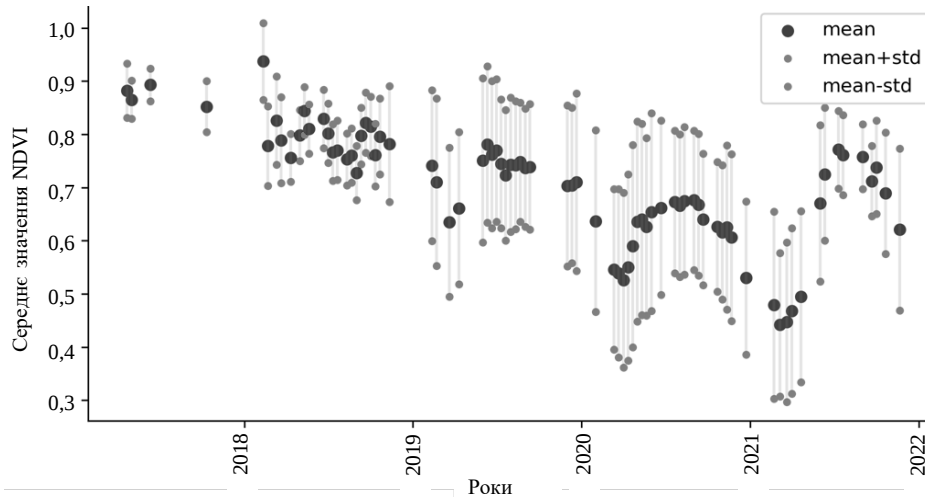


Рис. 6

На рис. 7 наведено відношення стандартного відхилення до середнього значення вегетаційного індексу NDVI. Його різке збільшення свідчить про наявність змін у лісовому покриві, зокрема, його хвороби та/або усихання як наслідку цих змін, що підтверджує припущення щодо інформативності варіативності ділянки лісу для відслідковування пошкоджень.

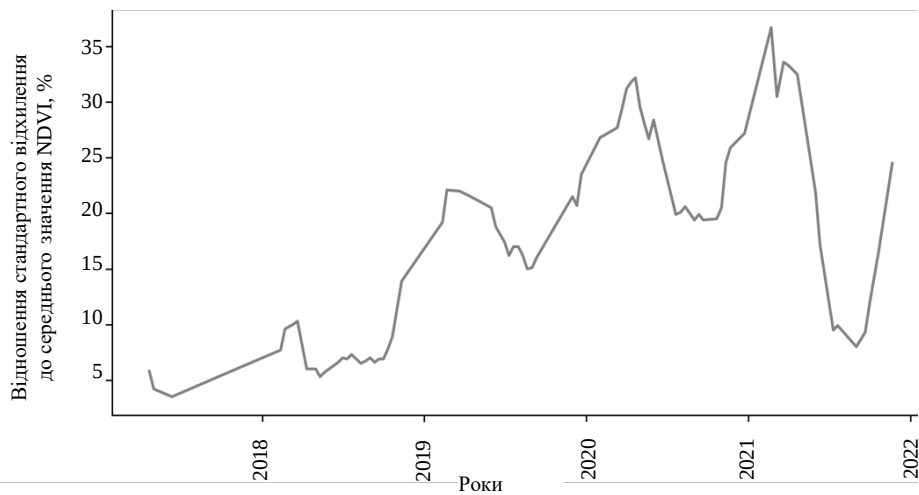


Рис. 7

Висновок

Створено дослідницький набір даних безхмарних супутникових знімків для навчання моделі нейронної мережі при виявленні пошкоджень лісів Франції, що містить 5573 зображення 79 тестових ділянок за 2017–2022 рр. На його основі визначено найбільш інформативні спектральні канали супутника Sentinel-2 для їхнього подальшого аналізу в процесі моніторингу пошкоджених лісів, якими виявилися канали B4 (665 нм), B8 (842 нм), B11 (1610 нм) та B12 (2190 нм).

Проаналізовано показники середнього значення та стандартного відхилення вегетаційного індексу NDVI у часі, за якими гіпотетично можна виявляти зміни в лісовому покриві за кожен наступний день.

У подальших дослідженнях для підвищення достовірності результатів виявлення пошкоджених лісів рекомендується враховувати період їхньої активної вегетації (найінформативнішими будуть знімки, отримані саме в цей період), а також кліматичну зону (це дасть можливість зменшити негативний вплив погодних умов на якість супутникових знімків). Також перспективним напрямком подальших досліджень є аналіз впливу здоров'я лісу на якість повітря та життя суспільства [22].

N. Hordiiko, H. Yailymova

ANALYSIS OF TIME SERIES OF SATELLITE DATA FOR MONITORING THE STATE OF FORESTS

Nataliia Hordiiko

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,

natalygor22@gmail.com

Hanna Yailymova

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and State
Space Agency of Ukraine, Kyiv,

anna.yailymova@gmail.com

Systems based on modern intelligent sensor monitoring technologies are able to monitor and control remote data about the environment in real time and facilitate a quick response to its changes before it becomes a problem. They allow for more efficient use of available resources, as data can be monitored and controlled remotely, without the need for physical access. Modern satellite sensors allow obtaining images of Earth's surface objects with high resolution, which allows creating detailed maps of the Earth's environment and makes space monitoring a powerful and effective tool for the analysis of climate change, environmental disasters and the global impact of human activity on the state of ecosystems, and their warning. In this work, a study was conducted to determine the most informative spectral bands of the Sentinel-2 satellite for the purpose of their further analysis in the process of satellite monitoring of damaged forests. The formation of a research data set of cloudless satellite images (test dataset) in the form of a time series of satellite images, the results of remote monitoring of forest areas (before and after damage). The resulting set of cloud-free satellite images consists of 5573 images. Using the example of the NDVI vegetation index, the hypothesis of a decrease in the average value of this vegetation index and an increase in its standard deviation when damage (disease) appears in a certain area of a coniferous forest is tested. The obtained results can be used in machine learning algorithms for the classification of damaged forests. The research was conducted in accordance with the scientific objectives of the EU project «Satellites for Wilderness Inspection and Forest Threat Tracking» (SWIFTT).

Keywords: sensors, spectral bands, Sentinel-2, satellite data analysis, intelligent environmental sensor monitoring technologies, forest state change detection.

ПОСИЛАННЯ

1. Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., ..., Bargellini P. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. 120. P. 25–36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
2. Mura M., Bottalico F., Giannetti F., Bertani R., Giannini R., Mancini M., ..., Chirici G. Exploiting the capabilities of the Sentinel-2 multi spectral instrument for predicting growing stock volume in forest ecosystems. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2018. Vol. 66. P. 126–134. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.11.013>

3. Gatti A., Bertolini A. Sentinel-2 products specification document. 2013. https://sentinel.esa.int/documents/247904/349490/S2_MSI_Product_Specification.pdf
4. Niro F., Goryl P., Dransfeld S., Boccia V., Gascon F., Adams J., ..., Doxani G. European space agency (ESA) calibration/validation strategy for optical land-imaging satellites and pathway towards interoperability. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, N 15. 3003 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13153003>
5. Kussul N., Yailymov B., Shelestov A., Yailymova H. Fire danger assessment based on the improved fire weather index. In *IGARSS 2022–2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2022. P. 1584–1587. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884378
6. Shumilo L., Lavreniuk M., Kussul N., Shevchuk B. Automatic deforestation detection based on the deep learning in Ukraine. *11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*. 2021. Vol. 1. P. 337–342. DOI: 10.1109/IDAACS53288.2021.9661008
7. Amani M., Ghorbanian A., Ahmadi S.A., Kakoei M., Moghimi A., Mirmazloumi S.M., ..., Brisco B. Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 2020. Vol. 13. P. 5326–5350. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.3021052
8. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Exploring google earth engine platform for big data processing: Classification of multi-temporal satellite imagery for crop mapping. *Frontiers in Earth Science*. 2017. 17 p.
9. Shelestov A., Lavreniuk M., Kussul N., Novikov A., Skakun S. Large scale crop classification using Google earth engine platform. *IEEE international geoscience and remote sensing symposium (IGARSS)*. 2017. P. 3696–3699.
10. S2 MPC Level-1 algorithm theoretical bases document, european space agency. 2023. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/4837553/Sentinel-2-Level-1-Algorithm-Theoretical-Basis-Document-ATBD.pdf/827fdad1-e3af-96af-e437-964e2aa8c35d>
11. Xue J., Su B. Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of Sensors Volume*. 2017. Article ID 1353691. P. 1–17. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>
12. Huang S., Tang L., Hupy J.P., Wang Y., Shao G. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*. 2021. Vol. 32, N 1. P. 1–6.
13. Jannoura R., Brinkmann K., Uteau D., Bruns C., Joergensen R.G. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*. 2015. Vol. 129. P. 341–351.
14. Tysiąc P., Strelets T., Tuszyńska W. The application of satellite image analysis in oil spill detection. *Applied Sciences*, 2022. Vol. 12, N 8. 4016 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12084016>
15. Moghimi M.M., Zarei A.R., Mahmoudi M.R. Seasonal drought forecasting in arid regions, using different time series models and RDI index. *Journal of Water and Climate Change*. 2020. Vol. 11, N 3. P. 633–654. DOI: <https://doi.org/10.2166/wcc.2019.009>
16. Wei M., Wang H., Zhang Y., Li Q., Du X., Shi G., Ren Y. Investigating the potential of crop discrimination in early growing stage of change analysis in remote sensing crop profiles. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, N 3. 853 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15030853>
17. Huo L., Persson H. J., Lindberg E. Early detection of forest stress from European spruce bark beetle attack, and a new vegetation index: normalized distance red SWIR (NDRS). *Remote Sensing of Environment*. 2021. Vol. 255. P. 1–18.
18. Bassine F.Z., Errami A., Khaldoun M. Vegetation recognition based on UAV image color index. *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. 2019. P. 1–4. DOI: 10.1109/EEEIC.2019.8783830.
19. Ulloa I.N., Chiang S.H., Yun S.H. Flood proxy mapping with normalized difference sigma-naught index and Shannon's entropy. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, N 9. P. 1384. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12091384>
20. Burns D.J., Rapetto F., Angelini G.D., Benedetto U., Caputo M., Ciulli F., Vohra H.A. Body mass index and early outcomes following mitral valve surgery for degenerative disease. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*. 2021. Vol. 161, N 5. P. 1765–1773. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtcvs.2019.10.193>
21. Wilson N.R., Norman L.M. Analysis of vegetation recovery surrounding a restored wetland using the normalized difference infrared index (NDII) and normalized difference vegetation index (NDVI). *International Journal of Remote Sensing*. 2018. Vol. 39, N 10. P. 3243–3274.
22. Kussul N., Shelestov A., Shumilo L., Titkov D., Yailymova H. Information Technology for Land Degradation Assessment Based on Remote Sensing. *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT*. 2021. Vol. 10, N 1. P. 113–117. DOI: 10.25673/76941

Отримано 19.06.2023
Доопрацьовано 10.08.2023