



ISSN 2411–6602 (Online)

ISSN 1607–2855 (Print)

Том 14 • № 2 • 2018 С. 70 – 77

<https://doi.org/10.18372/2411-6602.14.10>

УДК 528.855+835

Оцінювання поля термодинамічної температури земної поверхні за супутниковими даними на основі класифікації земного покриття

Я.І. Зелик*, Л.В. Підгородецька, С.В. Чорний

Інститут космічних досліджень НАН України і ДКА України, 03680, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 40, корпус 4/1

Обґрунтовано та реалізовано у середовищі Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) для QGIS метод оцінювання поля термодинамічної температури земної поверхні за супутниковими даними довгохвильового інфрачервоного діапазону на основі класифікації земного покриття в оптичному діапазоні випромінювання за методами машинного навчання. Для реалізації та попередньої перевірки методу використані супутникові зображення Landsat 8 OLI і TIRS, які містять пожежонебезпечні торфовища у дати явно вираженої пожежної небезпеки. Встановлено, що контури ділянок земної поверхні, отримані з умов перевищення експериментально підібраних порогових значень термодинамічної температури за побудованим температурним растром земної поверхні, узгоджуються з наземною інформацією про тління і пожежі на торфовищах.

Ключові слова: термодинамічна температура земної поверхні; яскравісна (радіаційна температура); температурний растр; коефіцієнт теплового випромінювання; класифікація земного покриття; метод максимальної правдоподібності; пожежонебезпечні торфовища; фаза тління; фаза полум'яного горіння; Landsat 8 (OLI, TIRS).

У статті обґрунтовано метод оцінювання поля термодинамічної температури земної поверхні за супутниковими даними довгохвильового інфрачервоного діапазону на основі класифікації земного покриття за даними оптичного діапазону випромінювання, яка здійснюється на основі методів машинного навчання.

Метод реалізовано у середовищі Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) [1], який є вільним інструментальним програмним засобом з відкритим кодом для Quantum GIS (QGIS) [2] і дозволяє здійснювати напівавтоматичну класифікацію багатоспектральних супутникових зображень, містить засоби попереднього пакетного оброблення (зокрема, атмосферної корекції) даних багатоспектральних каналів, післяоброблення та розрахунку растрових і векторних зображень різноманітного тематичного спрямування.

Результати використані для дослідження поля термодинамічної температури поверхні пожежонебезпечних торфовищ Київської області за даними супутникових зображень Landsat 8 (OLI і TIRS)

1. ЕТАПИ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ ТА ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Вибір супутникових зображень теренів, що охоплюють пожежонебезпечні торфовища у певних інтервалах дат викликів щодо тління та пожеж, завантаження даних спектральних каналів у середовищі SCP та формування множини оброблюваних каналів.

2. Попереднє оброблення зображень: спрощена атмосферна корекція за відносним методом віднімання темного об'єкта (Dark Object Subtraction — DOS1 [3, 4]) на основі конкретного знімка та перетворення цифрових значень пікселів оптичних каналів у спектральну відбивну здатність земної поверхні [1].

3. Створення навчальних вибірок даних з ROI (Region-of-Interest) на основі псевдокольорових композитів даних каналів за методами напівавтоматичного оконтурювання ділянок полігонами або розширення областей для класів та макрокласів земного покриття [1].

4. Контрольована класифікація земного покриття за пакетно відтятими растрами множини оптичних каналів за методом максимальної правдоподібності [5]; створення растру класифікації та оцінювання точності класифікації [1].

5. Визначення коефіцієнтів теплового випромінювання (thermal emissivity) ділянок земної поверхні та побудова відповідного растра з врахуванням належності відповідних пікселів зображення в оптичному діапазоні до певного класу земного покриття, отриманого у результаті класифікації [1, 3, 6, 7].

6. Перерахунок цифрових значень пікселів довгохвильових інфрачервоних каналів в ефективну яскравісну (радіаційну) температуру біля сенсора [1, 8].

7. Оцінювання термодинамічної температури земної поверхні шляхом перерахунку ефективної радіаційної температури біля сенсора з використанням коефіцієнтів теплового випромінювання (thermal emissivity), характерних для кожного класу земного покриття, та побудова растрового зображення поля термодинамічної температури [1, 3, 6, 7].

* Зелик Ярема Ігорович; ✉ adapt09@gmail.com

8. Створення векторного шару болотних мінеральних та торфових ґрунтів низовинних місцевостей для Київської області на основі карт ґрунтів України і даних цифрової моделі рельєфу та векторного шару населених пунктів у межах ґрунтів з атрибутивною інформацією про місця і дати пожеж.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Контрольована класифікація земного покриву здійснювалась за пакетно відтятими растрами множини оптичних каналів супутника Landsat 8 на основі створених у напівавтоматичному режимі ROI, які, у свою чергу, були побудовані за псевдокольоровими композитами даних каналів. На рис. 1 та 2 відображено растри псевдокольорових композитів (4-3-2 (August 5, 2016) та 3-2-1 (October 15, 2015) відповідно) атмосферно скоригованих даних оптичних каналів Landsat 8 та векторний шар болотних мінеральних і торфових ґрунтів низовинних місцевостей та населених пунктів у межах ґрунтів з атрибутивною інформацією про дати пожеж.

На рис. 3 та 4 відображені навчальні ROI у макрокласах Забудова та Вода на тлі псевдокольорового композиту 4-3-2 та температурного растру (October 15, 2015) відповідно, створені за методом розширення областей [1] у зображеннях міст на досліджуваних територіях. З рис. 4 видно, що різні класи земного покриву мають свою характерну випромінювальну здатність.

На рис. 5 відображено растр класифікації земного покриву на 4 основні макрокласи за методом максимальної правдоподібності [5], отриманий на основі зображення Landsat 8 від August 5, 2016 за

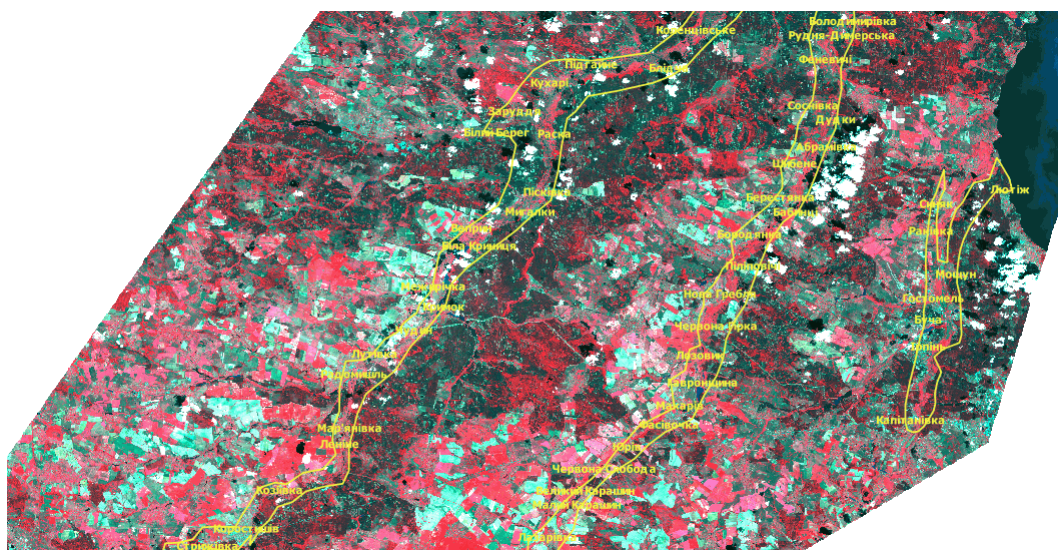


Рис. 1. Пакетно відтятий растр псевдокольорового композиту 4-3-2 (August 5, 2016) атмосферно скоригованих даних оптичних каналів Landsat 8 та векторний шар болотних мінеральних і торфових ґрунтів низовинних місцевостей і населених пунктів у межах ґрунтів з атрибутивною інформацією про дати пожеж

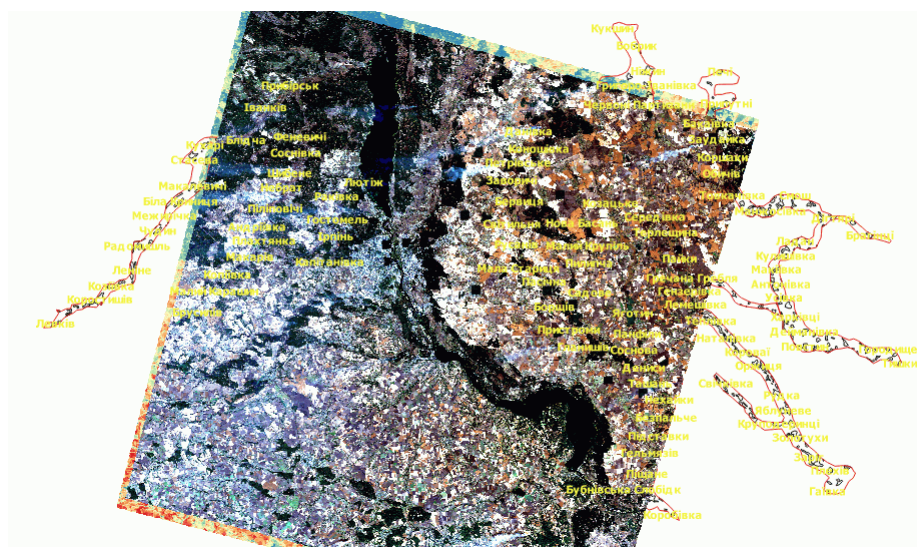


Рис. 2. Пакетно відтятий растр псевдокольорового композиту 3-2-1 (October 15, 2015) атмосферно скоригованих даних оптичних каналів Landsat 8 та векторний шар болотних мінеральних і торфових ґрунтів низовинних місцевостей та населених пунктів у межах ґрунтів з атрибутивною інформацією про дати пожеж

навчальною вибіркою створених ROI, а на рис.6 наведена інформація про 4 макрокласи покриття: 0 — неklasифіковані пікселі (Unclassified); 1 — вода (Water); 2 — забудова (Built-up); 3 — рослинність (Vegetation); 4 — відкритий ґрунт (Bare soil). Некласифіковані пікселі практично відсутні. Сіро-синім кольором відображені хмари та тіні від хмар.

На рис. 7 наведено растр коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні, отриманий на основі перекласифікації растру класифікації (рис.5) з використанням таблиці 1 відповідності між класами земного покриття і коефіцієнтом теплового випромінювання, яка отримана з [1, 3, 6, 7].

На рис. 8 наведено растр поля термодинамічної температури земної поверхні, відображений у середовищі Semi-Automatic Classification Plugin, отриманий у результаті перерахунку ефективної радіаційної температури біля сенсора з використанням растру коефіцієнта теплового випромінювання (рис.7) на основі [1, 3, 6, 7].

У статті [9], присвяченій ідентифікації тліючих пожеж на торфовищах в Індонезії за даними довгохвильового інфрачервоного діапазону Landsat 8 (TIRS), на основі результатів наукових досліджень наведено криві спектральної енергетичної яскравості (згідно з законом Планка), випромінюваної фоновими об'єктами земної поверхні (background phase) та торфовищами на фазах тління (smoldering phase) та полум'яного горіння (flaming phase). Вказані криві Планка відображені на рис. 9 [9]. На нижньому графіку (В) відображені криві, що відповідають усередненим температурам фонових об'єктів земної поверхні (300 K), фазі тління (400 K), фазі полум'яного горіння (800 K) та сумарна крива Планка теплового

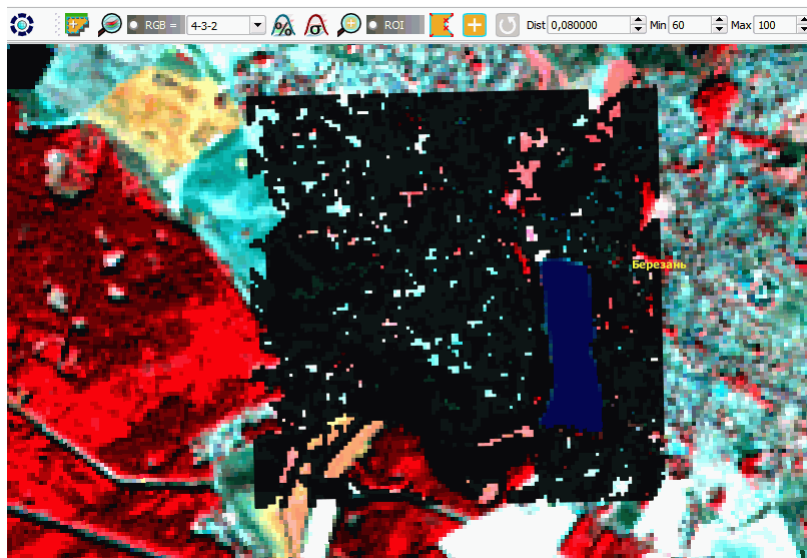


Рис. 3. Навчальний ROI у макрокласі “Забудова” на тлі псевдокольорового композиту 4-3-2 (October 15, 2015) в околицях м. Березань, що охоплює озеро, — ROI макрокласу “Вода”

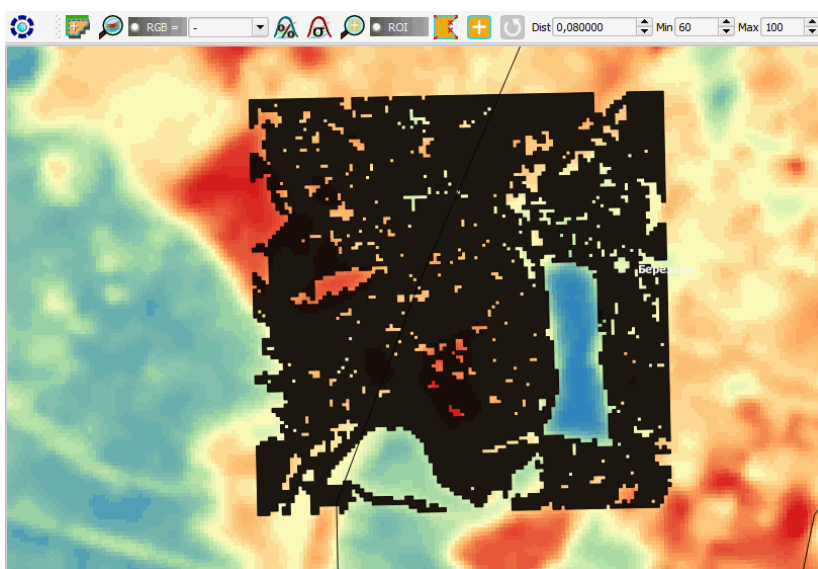


Рис. 4. Навчальний ROI у макрокласі “Забудова” на тлі температурного растру земної поверхні (October 15, 2015) в околицях м. Березань, що охоплює озеро, — ROI макрокласу “Вода”

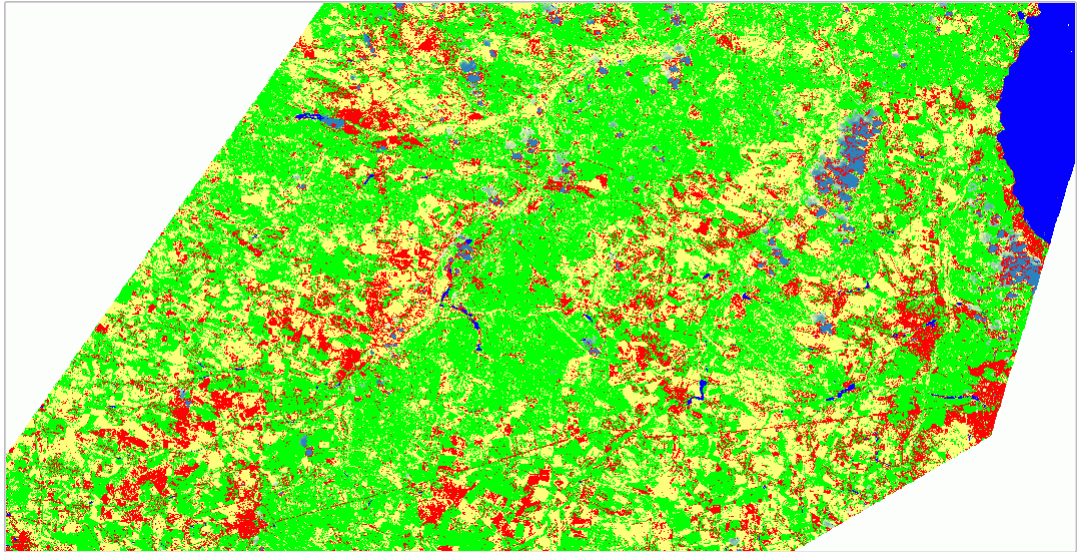


Рис. 5. Растр класифікації земного покриття на 4 основні макрокласи від August 5, 2016

ROI creation

Macroclasses

	MC ID	MC Info	Color
1	0	Unclassified	Black
2	1	Water	Blue
3	2	Built-Up	Red
4	3	Vegetation	Green
5	4	Bare-Soil	Yellow

Classification style

Load qml

Рис. 6. Інформація про 4 основні макрокласи земного покриття

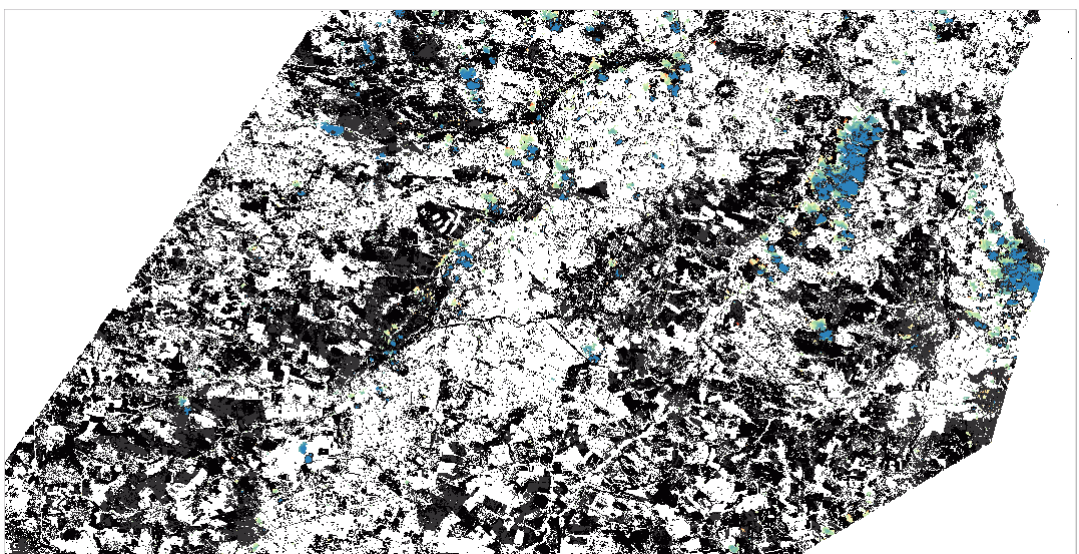


Рис. 7. Растр коефіцієнта теплового випромінювання земної поверхні від August 5, 2016

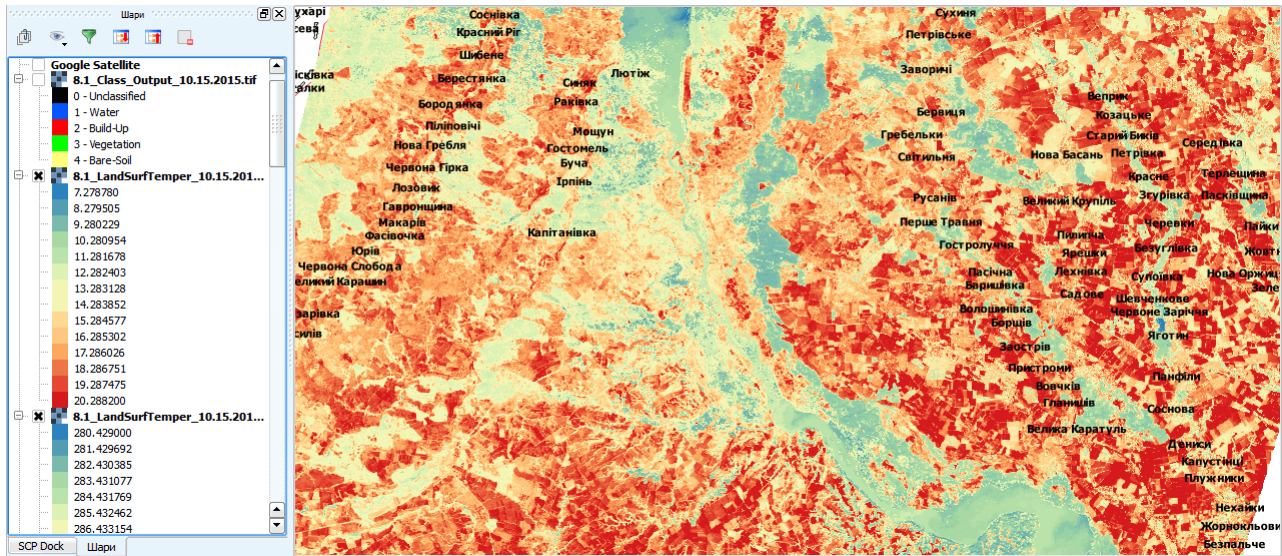


Рис. 8. Растр поля термодинамічної температури земної поверхні від October 15, 2015

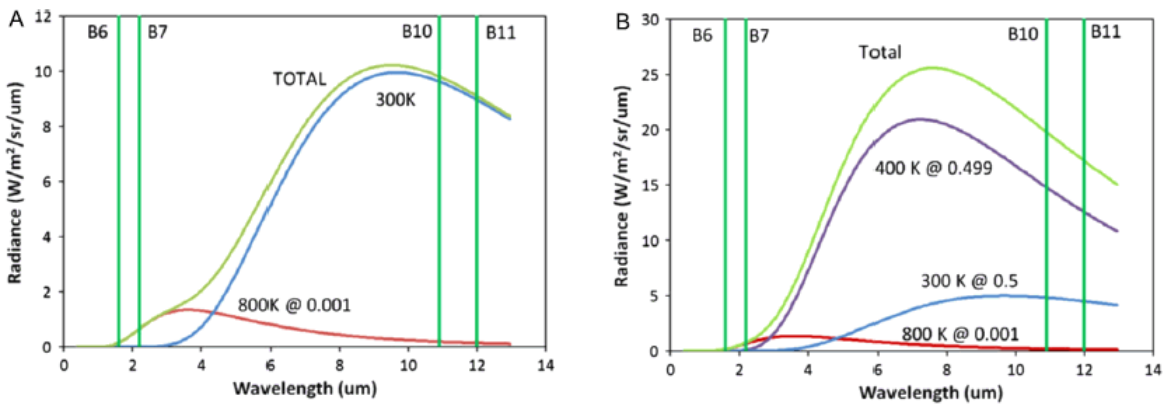


Рис. 9. Криві спектральної енергетичної яскравості (згідно з законом Планка), випромінюваної фоновими об'єктами земної поверхні (background phase, 300 K) та торфовищами на фазі тління (smoldering phase, 400 K) та фазі полум'яного горіння (flaming phase, 800 K)



Рис. 10. Фрагмент растру поля термодинамічної температури земної поверхні (October 15, 2015), який містить об'єкт з термодинамічною температурою $T_{surf} = 102,4^{\circ}\text{C} = 375,55\text{ K}$

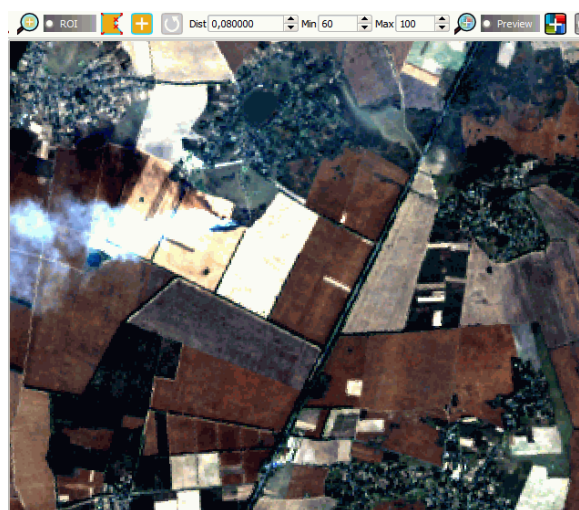


Рис. 11. Фрагмент растру псевдокольорового композиту 3-2-1 (October 15, 2015) даних оптичних каналів Landsat 8 (OLI), який містить об'єкт з термодинамічною температурою $T_{surf} = 102,4^{\circ}\text{C} = 375,55\text{ K}$

Таблиця 1. Відповідність між класами земного покриття та значеннями коефіцієнта теплового випромінювання

Клас земного покриття	Коефіцієнт теплового випромінювання
Water	0,98
Built-up	0,94
Vegetation	0,98
Bare-soil	0,93

випромінювання всіх трьох фаз. З нижнього графіка (В) випливає, що найбільший внесок у сумарну криву Планка спектральної енергетичної яскравості випромінювання вносить фаза тління торфовищ (400 K), а фаза полум'яного горіння торфовищ (800 K) вносить найменший вклад, навіть менший, ніж background phase (300 K). Крім того, з нижнього графіка (В) рис. 9 видно, що тепловий інфрачервоний канал В10 (вертикальна лінія на графіку) Landsat 8 (TIRS), за даними якого і визначається термодинамічна температура земної поверхні, істотно перетинається кривими Планка, що відповідають фазам background phase (300 K) і тління торфовищ (400 K), а не фазі полум'яного горіння (800 K). Тому за даними каналу В10 можна адекватно оцінювати тільки термодинамічну температуру background phase та фази тління, а фаза полум'яного горіння торфовищ, максимум кривої Планка для якої відповідає $\sim 3,6$ мкм, можна спостерігати у каналах видимого діапазону Landsat 8 (OLI) за нічними знімками, які зустрічаються рідко.

До того ж можливе «насичення» аналого-цифрового перетворювача (АЦП) каналу В10 Landsat 8 (TIRS), якщо цифрові значення пікселів у каналі В10 досягають значення $DN_{10} = 2^{16} - 1 = 65\,535$. Тому за даними каналу В10 Landsat 8 можна оцінювати лише температуру фази тління торфовищ, яка не перевищує температури, що викликає насичення АЦП каналу В10. Останній факт зафіксовано за побудованим растром поля термодинамічної температури земної поверхні від October 15, 2015, фрагмент якого відображений на рис. 10.

На рис. 10 відображено фрагмент растру поля термодинамічної температури земної поверхні від October 15, 2015, який містить об'єкт з термодинамічною температурою $T_{surf} = 102,4^{\circ}\text{C} = 375,55$ K (район с. Озерне Київської області). При цьому $DN_{10} = 65\,535$, ефективна радіаційна температура біля супутникового сенсора становить $T_{brith} = 94,88^{\circ}\text{C}$ і має місце насичення АЦП каналу В10 Landsat 8 (TIRS). Реальна ж термодинамічна температура земної поверхні може виявитись і вищою, ніж $T_{surf} = 102,4^{\circ}\text{C} = 375,55$ K, і, крім фази тління, може мати місце ще й фаза субпіксельного полум'яного горіння на об'єкті. На рис. 11 відображено фрагмент псевдокольорового композиту 3-2-1 (October 15, 2015) даних оптичних каналів Landsat 8 (OLI) і видно, що з об'єктом високої термодинамічної температури, відображеним на рис. 10, пов'язаний дим, що виходить з вузького рубця на об'єкті, проте полум'я не видно. Цей факт свідчить про те, що на вказаному об'єкті має місце фаза тління, а якщо і присутня фаза горіння, то вона має субпіксельний масштаб.

Контури ділянок земної поверхні, отримані з умов перевищення експериментально встановлених порогових значень термодинамічної температури за побудованим температурним растром, відображеним на рис. 8, узгоджуються з наземною інформацією про тління і пожежі на торфовищах. На рис. 12 зображені

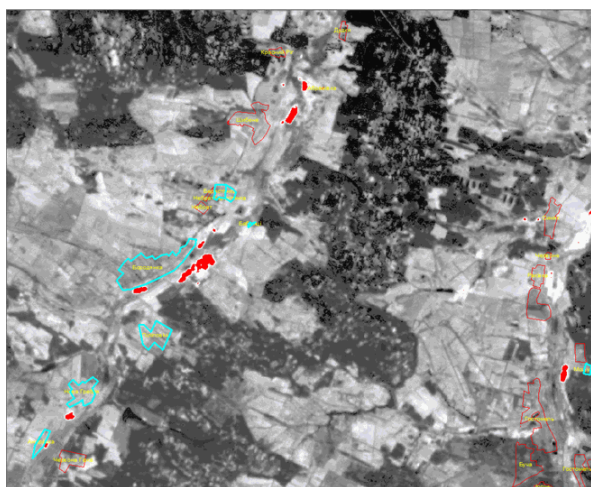


Рис. 12. Ділянки з $T_{surf} > 23^{\circ}\text{C}$ (червоні), узгоджені з ділянками викликів щодо пожеж (синій контур) (October 15, 2015)

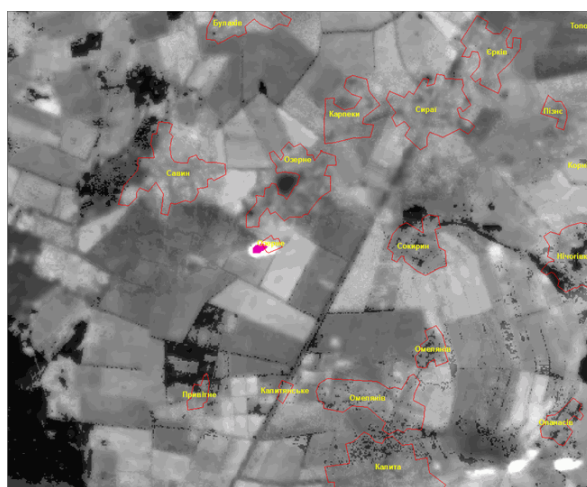


Рис. 13. Тільки одна існуюча ділянка з $T_{surf} > 47^{\circ}\text{C}$ (червона) (October 15, 2018)

ділянки з $T_{surf} > 23^{\circ}\text{C}$ (червоні), узгоджені з ділянками викликів щодо пожеж (синій контур) (October 15, 2015). На рис. 13 відображена тільки одна існуюча ділянка з $T_{surf} > 47^{\circ}\text{C}$ (червона).

3. ВИСНОВКИ

Крім значного періоду (16 діб) повторного огляду ділянки земної поверхні, багатоспектральні дані Landsat 8 мають те істотне обмеження, що дозволяють оцінювати лише фазу тління торфовищ. Верхня межа ефективної яскравісної (радіаційної) температури біля сенсора за даними теплового інфрачервоного каналу B10 (11 мкм) через насичення його АЦП становить $T_{brith_max} = 94,88^{\circ}\text{C} = 368\text{ K}$. Дані короткохвильових інфрачервоних каналів B6 (1,6 мкм), B7 (2,2 мкм) можуть використовуватись для виявлення осередків відкритого полум'я лише стосовно нічних супутникових зображень Landsat 8 (OLI), які зустрічаються рідко.

Через субпіксельні розміри осередків полум'я на торфовищах у межах осередків фази тління значних розмірів використання традиційних порогових алгоритмів виявлення відкритого полум'я за даними приладів AVHRR та MODIS при кілометровому просторовому розрізненні не можна вважати ефективним стосовно торфовищ.

Альтернативою в оцінюванні фаз тління та полум'яного горіння на торфовищах є підвищення просторового розрізнення зображень теплових полів на основі методу, який розробляється авторами, і полягає у поєднанні багатоспектральних даних від сенсорів різної природи різних супутникових місій і використанні багатопарових регресійних моделей для злиття цих різномірних даних та обробленні даних за методами машинного навчання.

Крім того, стосовно пожежонебезпечних торфовищ слід розвивати мережі наземних дистанційних сенсорів вимірювань температури, вологості, інших метеорологічних показників та застосовувати безпilotне повітряне інфрачервоне знімання високого розрізнення, зокрема, на основі досвіду такого роду державних проєктів в Індонезії.

Подальші наукові дослідження будуть зосереджені на удосконаленні та застосуванні розроблюваного методу підвищення просторового розрізнення зображень теплових полів, процедур ідентифікації диму на основі методів класифікації, оцінюванні регіонального (для Київщини) індексу загроз пожеж на торфовищах, який пропорційний інтегральній за період пожеж різниці рівня кількості опадів та рівня евапотранспірації (evapotranspiration) сушею, водними структурами, рослинами.

Визнання. Дослідження проведені у межах Цільової програми наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки як національний сегмент проєкту Горизонт-2020 ERA-PLANET» (ERA-PLANET-UA).

1. Semi-Automatic Classification Plugin Documentation [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/en/latest/#> (01.11.2018)
2. QGIS. A Free and Open Source Geographic Information System [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.qgis.org/en/site/> (01.11.2018).
3. *Sobrino J., Jiménez-Muñoz J.C., Paolini L.* Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5 // *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol. 90. — P.434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
4. *Moran M., Jackson R., Slater P., Teillet P.* Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output // *Remote Sensing of Environment*. — 1992. — Vol. 41. — P.169–184. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(92\)90076-v](https://doi.org/10.1016/0034-4257(92)90076-v)
5. *Richards J.A., Jia X.* *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. — Springer, 2006. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03978-6>
6. *Weng Q., Lu D., Schubring J.* Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies // *Remote Sensing of Environment*. — 2004. — Vol. 89. — P.467–483. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
7. *Mallick J., Singh C.K., Shashtri S., Rahman A., Mukherjee S.* Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. — 2012. — Vol. 19. — P.348–358. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.002>
8. Using the USGS Landsat Level-1 Data Product [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://landsat.usgs.gov/using-usgs-landsat-8-product> (01.11.2018).
9. *Elvidge C.D., Zhizhin M., Feng-Chi Hsu, Baugh K., Khomarudin M.R., Vetruta Y., Sofan P., Suwarsono, Dadang Hilman* Long-wave infrared identification of smoldering peat fires in Indonesia with nighttime Landsat data // *Environ. Res. Lett.* — 2015. — Vol. 10, No. 6. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/6/065002>

Оценивания поля термодинамической температуры земной поверхности по спутниковым данным на основе классификации земного покрова

Зельк Я.И., Подгородецкая Л.В., Черный С.В.

Институт космических исследований НАН Украины и ГКА Украины,
03680, г. Киев, пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1

Обоснован и реализован в среде Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) для QGIS метод оценивания поля термодинамической температуры земной поверхности по спутниковым данным длинноволнового инфракрасного диапазона на основе классификации земного покрова в оптическом диапазоне излучения с использованием методов машинного обучения. Для реализации и предварительной проверки метода использованы спутниковые изображения Landsat 8 OLI и TIRS, содержащие участки пожароопасных залежей торфа в даты явно выраженной пожарной опасности. Установлено, что контуры участков земной поверхности, полученные из условий превышения экспериментально подобранных пороговых значений термодинамической температуры по построенному температурному растру земной поверхности, согласуются с наземной информацией о тлении и пожарах на торфяниках.

Ключевые слова: термодинамическая температура земной поверхности; яркостной (радиационная температура); температурный растр; коэффициент теплового излучения; классификация земного покрова; метод максимального правдоподобия; пожароопасные торфяники; фаза тления; фаза пламенного горения; Landsat 8 (OLI, TIRS).

Estimation of the thermodynamic temperature field of the land surface using satellite data based on land cover classification

Zyelyk Ya.I., Pidgorodetska L.V., Chornyy S.V.

Space Research Institute NASU & SSAU, Hlushkova Avenue 40, building 4/1, 03680 Kyiv, Ukraine

The method for estimation of the thermodynamic temperature field of the land surface using satellite data of the long-wave infrared band based on the land cover classification in the optical wavelength range using machine learning methods has been justified. The method is implemented in the Semi-Automatic Classification Plugin (SCP) for QGIS. The vector layer of the marsh mineral and peat soils for the lowland areas in the Kyiv region on the basis of Ukrainian soil maps and the SRTM Digital Elevation Data has been created. The vector layer of settlements within these soils has been constructed with the attributive information on places and dates of fires on peat lands. For the implementation and preliminary verification of the method, Landsat 8 OLI and TIRS satellite imagery were used, containing areas of fire-hazardous peat lands on the dates of the pronounced fire hazard. The rasters of the land cover classification based on the Maximum Likelihood Method and rasters of the thermal emissivity have been created. The thermal emissivity raster is characteristic for the obtained land cover classes. The rasters of the land surface thermodynamic temperature have been constructed by conversion of the effective brightness temperature at the satellite sensor using the thermal emissivity raster. In addition to long revisit period of the land surface area (16 days), the multispectral Landsat 8 (OLI and TIRS) data have the significant limitations that allow on their basis assess only the smoldering phase on the peat lands. The upper limit of the effective brightness temperature at the satellite sensor, based on the data of the thermal infrared band B10 (11 μm), due to "saturation" of its ADC, is $T_{\text{brith_max}} = 94.88^\circ\text{C} = 368\text{ K}$. Data of shortwave infrared bands B6 (1.6 μm), B7 (2.2 μm) can be used to detect open flame hearth based only on nighttime Landsat 8 (OLI) imagery that are rare. It has been established that the contours of the land areas, obtained from the conditions for exceeding the experimentally set threshold values of the thermodynamic temperature from the constructed temperature raster, are consistent with ground-based information on smoldering and fires on peat lands. Further research will focus on the improvement and implementation of the developed method for the enhancement of the spatial resolution of thermal field images, smoke identification procedures based on classification methods. The regional (for the Kyiv region) index of peat lands fires will be assessed, which is proportional to the integrated during the period of fires value of the difference between the amount of atmospheric precipitations and the amount of evapotranspiration from the land, water structures and plants.

Keywords: thermodynamic temperature of the land surface; brightness (radiation) temperature; temperature raster; thermal emissivity; land cover classification, maximum likelihood method; fire hazardous peat lands; smoldering phase; flaming phase; Landsat 8 (OLI, TIRS).

Надійшла до редакції / Received	2.11.2018
Виправлена авторами / Revised	12.12.2018
Прийнята до друку / Accepted	19.12.2018