

MARTA SZOSTAK, KACPER KNAPIK, JUSTYNA LIKUS-CIEŚLIK, PIOTR WĘŻYK,
MARCIN PIETRZYKOWSKI

Monitorowanie zasięgu roślinności o charakterze leśnym w obszarach rekultywowanych z zastosowaniem zobrażeń satelitarnych Sentinel-2*

Monitoring the spatial range of forested areas in the reclaimed sites using Sentinel-2 images

ABSTRACT

Szostak M., Knapik K., Likus-Cieślak J., Wężyk P., Pietrzykowski M. 2019. Monitorowanie zasięgu roślinności o charakterze leśnym w obszarach rekultywowanych z zastosowaniem zobrażeń satelitarnych Sentinel-2. Sylwan 163 (1): 55-61.

Presented research investigates the possibility of applying the newest, free available satellite images Sentinel-2 for the automation of land use/cover (LULC) mapping in reclaimed areas, mainly in the aspect of monitoring forested areas. The study was performed for the former sulphur mines: 'Machów' (871.7 ha of the dump area after the opencast strip mine) and 'Jeziórko' (216.5 ha of the afforested area after the borehole exploitation). These areas are characterized by a diverse terrain structure and vegetation cover as the result of reclamation. The applied directions of reclamation were agro-forestry for the Sulphur Mine 'Machów' and forestry for the Sulphur Mine 'Jeziórko'. We verified whether processing of Sentinel-2 data allows for reliable LULC classification – mainly identification forested areas in relation to the LULC mapping prepared by manual vectorization of orthophotomaps. Obtained classification results for Sentinel-2 data were also compared to the results of Landsat 8 images processing. The results of Sentinel-2 images classification showed correct graphical representation of the LULC classes, especially forested areas, in the relation to the results of applied on-screen vectorization of aerial orthophotomaps – better than results of the Landsat 8 images processing. The area of the mail class 'Forests' as a result of classification Sentinel-2 and Landsat 8 images compared to the results of manual on-screen vectorization of the orthophotomaps shows differences: 5.4% – Sentinel-2, 12.8% – Landsat 8 for Sulphur Mine 'Machów' and 1.8% – Sentinel-2, 8.8% – Landsat 8 for Sulphur Mine 'Jeziórko'. Research indicates the possibility of automation of LULC classification using Sentinel-2 images. It could be very useful for LULC changes monitoring in reclaimed areas, mainly in the aspect of forested areas mapping as a result of way of reclamation.

KEY WORDS

image processing, manual vectorization, spatial analyses, reclamation

ADDRESSES

Marta Szostak ⁽¹⁾ – e-mail: m.szostak@ur.krakow.pl

Kacper Knapik ⁽¹⁾, Justyna Likus-Cieślak ⁽²⁾, Piotr Wężyk ⁽¹⁾, Marcin Pietrzykowski ⁽²⁾

⁽¹⁾ Instytut Zarządzania Zasobami Leśnymi, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

*Badania zostały sfinansowane z dotacji przyznanej przez MNiSW na działalność statutową.

(2) Instytut Ekologii i Hodowli Lasu, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie; al. 29 Listopada 46, 31-425 Kraków

Wstęp

Automatyzacja procesu wykrywania i monitorowania zmian w zakresie pokrycia i użytkowania terenu, w tym m.in. określania powierzchni terenów zadrzewionych i zakrzewionych, jest tematem wielu opracowań [Bergen, Dronova 2007; Oikonomakis, Ganatsas 2012; Ruskule i in. 2012; Szostak i in. 2018]. Niewiele badań z tego zakresu dotyczy obszarów rekultywowanych [Townsend i in. 2009; Szostak i in. 2015, 2018; Wężyk i in. 2015; Urban i in. 2016; Yuan i in. 2018], mimo iż monitorowanie roślinności o charakterze leśnym na terenach postindustrialnych jest aspektem szczególnie ważnym i aktualnym, głównie w zakresie oceny wyników prowadzonej rekultywacji.

W niniejszym opracowaniu wskazano możliwość automatyzowania procesu monitorowania obszarów zadrzewionych i zakrzewionych na terenach rekultywowanych poprzez zastosowanie nowoczesnych geodanych i metod geoinformacyjnych. Do wykonania prac wybrano najnowsze ogólnodostępne zobrazenia Sentinel-2 udostępniane przez współpracujące ze sobą ESA i Komisję Europejską w strukturach programu Copernicus. Zobrazenia Sentinel-2 to nowość w aspekcie darmowych produktów o lepszych parametrach, głównie w zakresie rozdzielczości terenowej. Misja Sentinel-2 składa się z dwóch satelitów – Sentinel-2A i Sentinel-2B – umieszczonych na wysokości 705 km na tej samej orbicie w odległości 180° od siebie i przy nachyleniu orbity 98,5°. Sentinel-2A został wyniesiony na orbitę w 2015 roku, a Sentinel-2B w 2017 roku. Satelity wyposażone są w nowoczesne skanery wielospektralne wysokiej rozdzielczości. Rejestracja promieniowania następuje w 13 kanałach spektralnych o rozdzielczości 10, 20 i 60 m. Pasma obrazowania to 290 km. Interwał powtarzania wynosi 10 dni dla jednego satelity i 5 dni dla dwóch (www.esa.int/ESA). Określono możliwość zastosowania zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 dla klasyfikacji form pokrycia i użytkowania terenu byłych kopalni „Jeziórko” i „Machów”, głównie w aspekcie wyznaczania obszarów roślinności o charakterze leśnym w odniesieniu do wcześniejszych opracowań, w zakresie wykorzystania wektoryzacji ortofotomapy oraz zobrażeń Landsat 8 [Szostak i in. 2015].

Teren badań

Jako obszary testowe wybrano tereny byłych Kopalni Siarki „Jeziórko” (50°32'43,7"N 21°47'33,0"E) i „Machów” (50°29'52,2"N 21°36'16,7"E), zlokalizowane w południowo-wschodniej Polsce w województwie podkarpackim, w powiecie tarnobrzeskim [Krzaklewski i in. 2016; Pietrzykowski, Krzaklewski 2017]. Dla Kopalni „Jeziórko” analizowano teren zalesiony po zakończonej eksploatacji o powierzchni 216,5 ha, a dla Kopalni „Machów” teren składowiska po kopalni odkrywkowej o powierzchni 871,7 ha.

Kopalnia Siarki „Jeziórko” działała w latach 1967-2001 i była największą w Polsce kopalnią otworową, w której stosowano metodę podziemnego wytapiania siarki. Prace rekultywacyjne na terenie rozpoczęto w 1993 roku. Przyjęto leśno-ekologiczny kierunek rekultywacji. Wprowadzono zróżnicowany skład gatunkowy drzew, dzięki czemu powstały warunki dla zasiedlenia terenu przez zwierzynę drobną i ptaki [Hajdo i in. 2007; Likus-Cieślak i in. 2015, 2017; Likus-Cieślak, Pietrzykowski 2017; Pietrzykowski, Likus-Cieślak 2018].

Kopalnia Siarki „Machów” powstała w 1968 roku jako czwarta w zagłębiu siarki i działała do 1992 roku. Do produkcji siarki z wydobytej rudy zastosowano odkrywkową i flotacyjno-rafinacyjną metodę wydobycia [Michno i in. 2009]. Rekultywacja zwałowiska Kopalni Siarki

„Machów” trwała w latach 1976-1998. Przyjęto rolno-leśny kierunek rekultywacji [Krzaklewski 1988; Gołda 2005; Gołda i in. 2005].

Material i metody

Niniejsze opracowanie wykonano, wykorzystując zobrazowanie satelitarne Sentinel-2A z 8 sierpnia 2016 roku (źródło: ESA), układ współrzędnych WGS84/UTM 34N, ortofotomapy lotnicze z roku 2015 (źródło: GUGiK – Główny Urząd Geodezji i Kartografii), układ współrzędnych PUWG PL 1992, piksel 0,25 m oraz dane z zakresu ewidencji gruntów i budynków (źródło: GEOPORTAL i portal webEWID, 2016), układ współrzędnych PUWG PL 1992. Zobrazowanie satelitarne zostało pobrane ze strony internetowej ESA COPERNICUS PROGRAMME (<https://scihub.copernicus.eu>), z określeniem parametrów takich jak: satelita, data pozyskania i maksymalny stopień zachmurzenia. Wstępne przetworzenie zostało wykonane w programie SNAP 3.0.0 (darmowe oprogramowanie ESA). Zastosowano przycięcie do obszaru obejmującego teren badań, zapisano kanały: Blue, Green, Red oraz NIR (piksel 10 m) i przeprowadzono eksport danych do formatu .dim oraz .tiff.

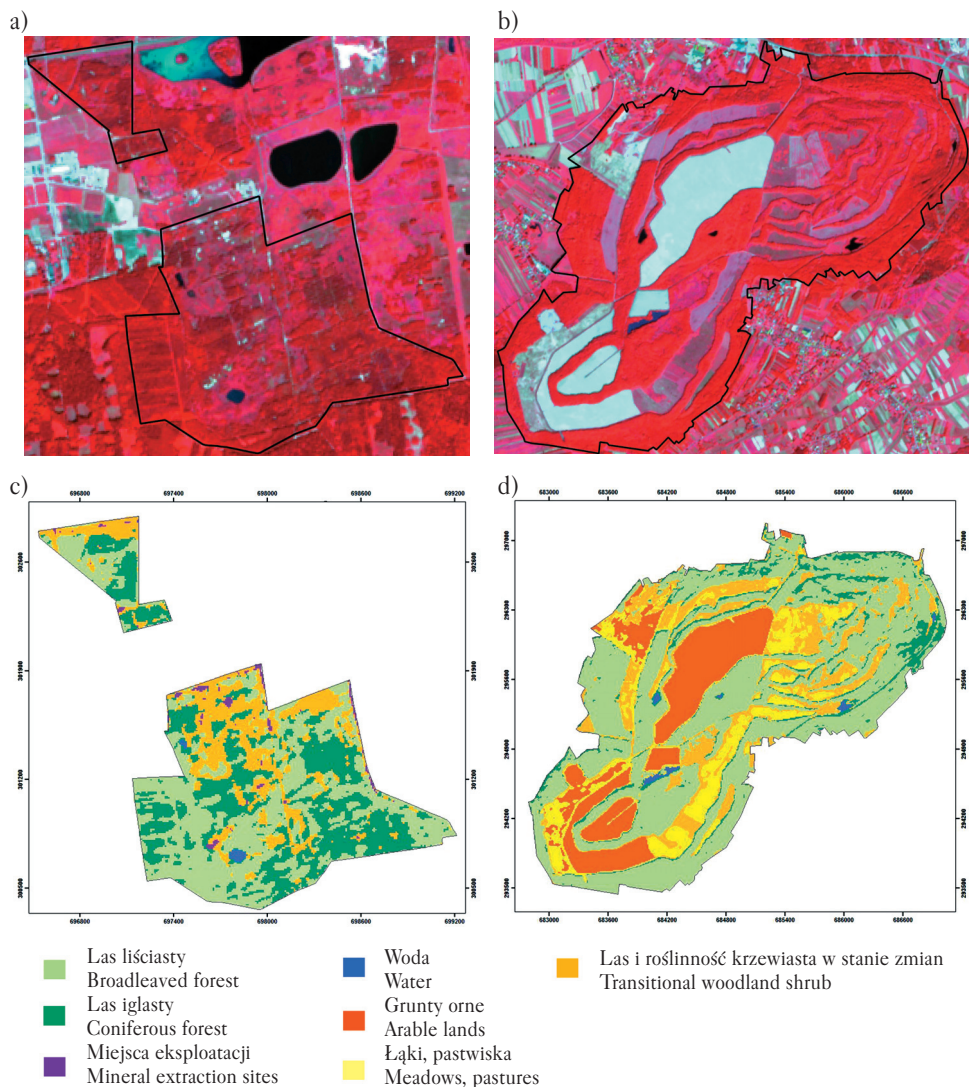
Główny etap opracowania to wykonanie klasyfikacji zobrazowania Sentinel-2 (w oprogramowaniu ILWIS 3.3, darmowa licencja). Na wstępie wykonano liniowe rozciągnięcie histogramów oraz przygotowano kompozycje barwne RGB oraz CIR. Klasyfikację przeprowadzono w oparciu o klucz fotointerpretacyjny przygotowany podczas wizji terenowej, dla kompozycji RGB oraz CIR. Wyróżniono następujące klasy pokrycia terenu, zgodnie z nomenklaturą klasyfikacji CORINE Land Cover (<https://land.copernicus.eu>): Las iglasty, Las liściasty, Las i roślinność krzewiasta w stanie zmian oraz Woda, dla Kopalni „Machów” Grunty orne i Łąki i pastwiska, a dla Kopalni „Jeziórko” Miejsca eksploatacji. Dla wykonania klasyfikacji obrazu wybrano klasyfikację nadzorowaną (pikselową) – algorytm minimum distance. Wynik poddano procesowi generalizacji (Majority Filter, Arc Map 10.5, ESRI). Ocenę wyników klasyfikacji przeprowadzono, określając miary dokładności [Congalton 1991]: Average Accuracy (AA), Average Reliability (AR) oraz Overall Accuracy (OA). Należy nadmienić, że klasyfikacja pikselowa nie jest najdokładniejszą metodą klasyfikacji – dokładniejsze wyniki można uzyskać, stosując bardziej zaawansowane metody, np. klasyfikację obiektową (ang. GEOBIA), ale wymaga to użycia specjalistycznego oprogramowania i wiedzy użytkownika [Szostak i in. 2014, 2016; Wężyk i in. 2016]. Istotą niniejszego opracowania było wskazanie możliwości wykorzystania ogólnodostępnych geodanych i darmowego oprogramowania.

Ostatnim etapem było uzyskanie informacji o łącznej powierzchni poszczególnych klas pokrycia i użytkowania terenu. Zgeneralizowany wynik klasyfikacji pikselowej zobrazowania Sentinel-2 przekonwertowano z warstwy rastrowej do wektorowej i określono udział poszczególnych klas. Rezultat odniesiono do wyników wektoryzacji ekranowej i przetwarzania zobrazowań Landsat 8 dla analizowanego terenu.

Wyniki i dyskusja

Wynik klasyfikacji zobrazowania Sentinel-2 dla kopalni „Jeziórko” i „Machów” przedstawiono na rycinie. Współczynnik OA określający dokładność klasyfikacji wyniósł dla Kopalni „Machów” 96,8%, a dla Kopalni „Jeziórko” 90,5%.

Efekt klasyfikacji pikselowej zobrazowań Sentinel-2 odniesiono do wyników wcześniejszego opracowania [Szostak i in. 2015] w zakresie ustalenia klas pokrycia i użytkowania terenów kopalni „Jeziórko” i „Machów” w oparciu o wykonaną wektoryzację ekranową ortofotomapy oraz klasyfikację zobrazowań Landsat 8 – wyniki przedstawiają bardzo dobre wartości w stosunku do



Ryc. 1.

Fragment zobrazowania Sentinel-2 oraz wynik klasyfikacji pikselowej dla analizowanych obszarów kopalni siarki „Jeziórko” (a, c) i „Machów” (b, d)

Part of Sentinel-2 image and pixel-based classification results for the area of ‘Jeziórko’ (a, c) and ‘Machów’ (b, d) sulphur mines

wektoryzacji ekranowej ortofotomap lotniczych oraz zdecydowanie lepszą graficzną prezentacją poszczególnych klas pokrycia terenu w stosunku do wyników klasyfikacji zobrazowań Landsat 8. Ustalono następujące różnice w zakresie udziału procentowego głównych klas pokrycia terenu kopalni „Jeziórko” i „Machów” dla wyników klasyfikacji zobrazowań Sentinel-2 w stosunku do wyników wektoryzacji ekranowej ortofotomapy [Szostak i in. 2015]:

- łączna klasa Las (zsumowane klasy Las liściasty i Las iglasty) – 1,8% różnicy dla Kopalni „Jeziórko” (lasy łącznie zajmują 75,4% terenu kopalni w oparciu o wektoryzację ortofotomapy, natomiast w wyniku klasyfikacji zobrazowań Sentinel-2 77,2%) oraz 5,4% róż-

- nicy dla Kopalni „Machów” (37,7% – Las jako wynik wektoryzacji ortofotomapy i 43,1% – według klasyfikacji Sentinel-2),
- Las i roślinność krzewiasta w stanie zmian – 4,9% różnicy dla Kopalni „Jeziórko” (klasa stanowi 13,4% terenu kopalni w oparciu o wynik wektoryzacji ortofotomapy i 18,3% w efekcie klasyfikacji zobrazowania Sentinel-2) oraz 2,0% różnicy dla Kopalni „Machów” (19,6% – ortofotomapa i 17,6% – Sentinel-2),
- dla Kopalni „Machów” znaczący udział stanowią także Grunty orne – różnica wyniosła 3,0% (ortofotomapa – 29,5%, Sentinel-2 – 26,5%) oraz Łąki i pastwiska – 5,7% różnicy (ortofotomapa – 6,5%, Sentinel-2 – 12,2%),
- pozostałe klasy stanowią znikomą część procentową terenów kopalni, więc różnice w tym zakresie nie były szczegółowo analizowane.

Powyższe wyniki klasyfikacji zobrazowań Sentinel-2 przedstawiają znacząco mniejszą różnicę w zakresie łącznej powierzchni poszczególnych klas pokrycia terenu w stosunku do wyników klasyfikacji zobrazowań Landsat 8 [Szostak i in. 2015]. Przykładowo dla głównej klasy Las różnica między klasyfikacją pikselową zobrazowań Landsat 8 a wektoryzacją ortofotomapy wynosiła w udziale procentowym 8,8% dla Kopalni „Jeziórko”, a dla Kopalni „Machów” 12,8%. Różnica dla klasy Las i roślinność krzewiasta w stanie zmian dla Kopalni „Jeziórko” to 10,3%, czyli są to różnice 2- lub 3-krotnie większe niż dla zobrazowań Sentinel-2.

Uzyskane wyniki klasyfikacji zobrazowań Sentinel-2 stanowią bardzo dobre odniesienie do tradycyjnie stosowanej fotointerpretacji ortofotomapy, co wskazuje na możliwość automatyzowania procesu klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu w oparciu o zobrazowania Sentinel-2. Oczywiście należy zaznaczyć, że uzyskane wyniki mogłyby być jeszcze lepsze przy zastosowaniu bardziej zaawansowanych metod klasyfikacji obrazu, np. GEOBIA [Blaschke i in. 2014; Cordeiro, Rossetti 2015; de Kok 2016; Szostak i in. 2016; Wężyk i in. 2016].

Podsumowanie

Obszary rekultywowane charakteryzują się dużym rozdrobnieniem klas pokrycia terenu, ale przetwarzanie zobrazowań Sentinel-2 pozwala na uzyskanie szczegółowej klasyfikacji pokrycia i użytkowania terenu, w tym m.in. podlegających dynamicznym zmianom obszarów roślinności o charakterze leśnym. Wskazuje to na możliwość stosowania klasyfikacji zobrazowań Sentinel-2 dla określania klas pokrycia terenów rekultywowanych.

Wykorzystanie zobrazowań Sentinel-2 otwiera nowe możliwości w zakresie monitorowania zmian zasięgu klas pokrycia terenu w dowolnym interwale czasowym, co jest ważnym aspektem w zakresie oceny wyników prowadzonej rekultywacji. Zastosowanie ortofotomapy czy zdjęć lotniczych jest ograniczone z powodu kosztów pozyskiwania tych materiałów. Ogólnodostępne zobrazowania Sentinel-2 i zautomatyzowane procedury ich przetwarzania, w tym m.in. klasyfikacji obrazu, dają nowe możliwości w aspekcie ciągłego monitorowania obszarów rekultywowanych, głównie w zakresie dobrej dokładności uzyskiwanych wyników klasyfikacji pokrycia terenu i dowolnego interwału czasowego analizowania zmian.

Literatura

- Bergen K., Dronova I. 2007. Observing succession on aspen-dominated landscapes using a remote sensing-ecosystem approach. *Landscape Ecology* 22: 1395-1410. DOI: 10.1007/s10980-007-9119-1.
- Blaschke T., Hay G. J., Kelly M., Lang S., Hofmann P., Addink E., Queiroz Feitosa R., van der Meer F., van der Werff H., van Coillie F., Tiede D. 2014. Geographic Object-Based Image Analysis – Towards a new paradigm. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 87: 180-191.

- Congalton R. G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment* 37: 35-46.
- Cordeiro C., Rossetti D. 2015. Mapping vegetation in a late Quaternary landform of the Amazonian wetlands using object-based image analysis and decision tree classification. *International Journal of Remote Sensing* 36 (13): 3397-3422.
- Gołda T. 2005. Rekultywacja. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków.
- Gołda T., Haładus A., Kulma R. 2005. Geosozjologiczne skutki likwidacji kopalni siarki w 19 rejonie Tarnobrzega. *Inżynieria Środowiska* 10 (1): 70-72.
- Hajdo S., Klich J., Galiniak G. 2007. Ekologiczne i technologiczne osiągnięcia w 40-letniej historii górnictwa otworowego siarki w Polsce. *Górnictwo i Geoinżynieria* 31 (3/1).
- de Kok R. 2016. Replacing the use of texture and sealed area in urban fabric classifications by integrating volume and object based distance calculations. University of Twente Faculty of Geo-Information and Earth Observation. GEOBIA 14.
- Krzaklewski W. 1988. Leśna rekultywacja i biologiczne zagospodarowanie nieużytków poprzemysłowych. Skrypt AR, Kraków.
- Krzaklewski W., Pietrzykowski M., Likus J., Pająk M., Twaróg A. 2016. Charakterystyka wybranych właściwości gleb i zbiorowisk roślinnych na terenach rekultywowanych i pozostawionych sukcesji po byłej kopalni siarki „Grzybów”. *Uniwersytet Zielonogórski. Zeszyty Naukowe* 161. *Inżynieria Środowiska* 41: 78-86.
- Likus-Cieślak J., Pietrzykowski M. 2017. Vegetation development and nutrients supply of trees in habitats with high sulfur concentration in reclaimed former sulfur mines Jeziórko (Southern Poland). *Environmental Science and Pollution Research* 24 (25): 20556-20566. DOI: 10.1007/s11356-017-9638-5.
- Likus-Cieślak J., Pietrzykowski M., Szostak M., Szulczewski M. 2017. Spatial distribution and concentration of sulfur in relation to vegetation cover and soil properties on a reclaimed sulfur mine site (Southern Poland). *Environmental Monitoring and Assessment* 189: 87. DOI 10.1007/s10661-017-5803-z.
- Likus-Cieślak J., Pietrzykowski M., Śliwińska-Siuśta M., Krzaklewski W., Szostak M. 2015. Preliminary assessment of soil sulphur contamination and vegetation characteristic in the vicinity of former boreholes on afforested post-mine site Jeziorko. *Geology, Geophysics and Environment* 42 (4): 371-380.
- Michno W., Dziedzic W., Czajkowski E. 2009. Przywracanie wartości użytkowych terenom górniczym na przykładzie KiZPS „SIARKOPOL”. Warsztaty „Zagrożenie naturalne w górnictwie”.
- Oikonomakis N., Ganatsas P. 2012. Land cover changes and forest succession trends in a site of Natura 2000 network (Elatia forest) in Northern Greece. *Forest Ecology and Management* 285 (1): 153-163.
- Pietrzykowski M., Krzaklewski W. 2017. Reclamation of mine lands in Poland. W: Prasad M. N. V., Favas P., Maiti S. K. [red.]. *Bio-Geotechnologies for mine site rehabilitation*. Chapter 27. Elsevier, Amsterdam – Oxford – Cambridge. 493-513.
- Pietrzykowski M., Likus-Cieślak J. 2018. Comprehensive Study of Soil-Plant and Surface Water Chemistry Relationships in Highly S Contaminated Environment on Reforested Former Sulfur Borehole Mine Sites. *Sustainability* 10 (7): 24-42. <https://doi.org/10.3390/su10072442>
- Ruskule A., Nikodemus O., Kasparinska Z., Kasparinskis R., Brumelis G. 2012. Patterns of afforestation on abandoned agriculture land in Latvia. *Agroforestry Systems* 85 (2): 215-231.
- Szostak M., Hawryło P., Piela D. 2018. Using of Sentinel-2 images for automation of the forest succession detection. *European Journal of Remote Sensing* 51 (1): 142-149. <http://dx.doi.org/10.1080/22797254.2017.1412272>
- Szostak M., Likus-Cieślak J., Knapik K., Wężyk P., Pietrzykowski M. 2018. Analysis of land use and land cover classes for the afforested post-mine site using Sentinel-2 images. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2018 Conference Proceedings. Ecology, Economics, Education and Legislation. Section Ecology and Environmental Protection 18 (5.2): 41-48. <https://doi.org/10.5593/sgem2018/5.2>
- Szostak M., Wężyk P., Hawryło P., Pietrzykowski M. 2015. The analysis of spatial and temporal changes of land cover and land use in the reclaimed areas with the application of airborne orthophotomaps and LANDSAT images. *Geodesy and Cartography* 64 (1): 75-86.
- Szostak M., Wężyk P., Hawryło P., Puchała M. 2016. Monitoring the secondary forest succession and land cover/use changes of the Błędów Desert (Poland) using geospatial analyses. *Quaestiones Geographicae* 35 (3): 5-13.
- Szostak M., Wężyk P., Tompalski P. 2014. Aerial Orthophoto and Airborne Laser Scanning as Monitoring Tools for Land Cover Dynamics: A Case Study from the Milicz Forest District (Poland). *Pure and Applied Geophysics* 171 (6): 857-866. DOI: 10.1007/s00024-013-0668-8.
- Townsend P., Helmers D., Kingdon C., McNeil B., de Beurs K., Eshleman K. 2009. Changes in the extent of surface mining and reclamation in the Central Appalachians detected using a 1976–2006 LANDSAT time series. *Remote Sensing of Environment* 113 (1): 62-72. DOI:10.1016/j.rse.2008.08.012.
- Urban R., Koska B., Moudry V., Solsky M. 2016. Terrain of post mining site from airship lidar. *SGEM2016 Conference Proceedings* 2 (2): 577-584.
- Wężyk P., Hawryło P., Szostak M., Pierzchalski P., de Kok R. 2016. Using GEOBIA and data fusion approach for land use and land cover mapping. *Quaestiones Geographicae* 35 (1): 93-104.

- Wężyk P., Szostak M., Krzaklewski W., Pająk M., Pierzchalski M., Szwed P., Hawryło P., Ratajczak M. 2015. Landscape monitoring of post-industrial areas using LiDAR and GIS technology. *Geodesy and Cartography* 64 (1): 125-137.
- Yuan Y., Zhao Z., Email Author, Niu S., Li X., Wang Y., Bai Z. 2018. Reclamation promotes the succession of the soil and vegetation in opencast coal mine: A case study from *Robinia pseudoacacia* reclaimed forests, Pingshuo mine, China. *Catena* 165: 72-79.