



## Badania komponentów środowiska przyrodniczego na obszarach pogórnich z wykorzystaniem wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych

Studies of components of the natural environment on post-mining areas with using high-resolution satellite imagery

Mgr inż. Anna Buczyńska<sup>\*)</sup>

**Treść:** Początki teledetekcji satelitarnej sięgają lat 50. ubiegłego wieku. Od tego czasu zarówno jakość, jak i rozdzielczości przestrzenna, radiometryczna oraz spektralna pozyskiwanych obrazów satelitarnych uległy istotnemu polepszeniu. Współczesne sensory optyczne pozwalają na otrzymanie obrazów wielospektralnych (pięć lub więcej kanałów spektralnych) z rozdzielczością kilku metrów w odstępie czasowym kilku dni. Pozyskiwanie danych w wielu zakresach spektralnych dało podstawy do stworzenia nowego narzędzia do oceny komponentów środowiska przyrodniczego jakim jest indeks środowiskowy. Do chwili obecnej opracowanych zostało wiele indeksów przeznaczonych między innymi do oceny kondycji pokrywy roślinnej oraz gleb, szacowania zawartości wody w środowisku przyrodniczym, analiz geologicznych oraz krajobrazowych. Niniejsze opracowanie ma na celu prezentację zastosowania wybranych indeksów w monitoringu środowiska przyrodniczego na obszarach pogórnich w Polsce i na świecie, które ze względu na swe rozległe powierzchnie stanowią prawdziwe wyzwanie dla klasycznych, naziemnych technik pomiaru. Publikacja prezentuje szerokie spektrum możliwych zastosowań powstałych do chwili obecnej indeksów środowiskowych, wskazuje na indeksy najczęściej wybierane oraz obrazowania, które wykorzystane zostały do ich opracowania. Niniejszy artykuł przedstawia zestawienie i podsumowanie badań prowadzonych w latach 2010-2019 w obszarach pogórnich, dotyczących wykorzystania wysokorozdzielczych, satelitarnych obrazów wielospektralnych na potrzeby analizy zmian komponentów środowiska naturalnego.

**Abstract:** The dawn of remote sensing dates back to the '50s of the previous century. Since that time quality and resolution (spatial, radiometric and spectral) of satellite images have vitally improved. Modern optical sensors allow to obtain hyperspectral imaging (five or more spectral channels) with several meters resolution within a few days. Data collected in many spectral ranges provided the basis of a new tool measuring the components of the natural environment, namely the environmental indices. Up to the present there were a lot of indices devised, mainly used to assess the condition of vegetation cover and soil, evaluate water content in the environment as well as for geological and landscape analyses. The aim of this study is to present the employment of selected indices in the environmental monitoring on post-mining areas both in Poland and worldwide, which vast surfaces are the challenge for classic, ground-based measuring techniques. The paper describes a wide range of possible applications of the environmental indices developed so far and points the most popular indices with the images used in order to obtain them. Study results summarize the research conducted between 2010 and 2019 on post-mining areas concerning the employment of high-resolution hyperspectral imaging for the purpose of analysing changes in the components of the natural environment.

### Słowa kluczowe:

teledetekcja, indeksy środowiskowe, obszar pogórnich, analiza literatury

### Key words:

remote sensing, environmental indices, post-mining area, literature analysis

## 1. Wprowadzenie

Przemysł wydobywczy w znacznym stopniu ingeruje w komponenty środowiska przyrodniczego, przyczyniając się między innymi do degradacji rodzimej roślinności, zmiany stosunków wodnych czy też zanieczyszczenia wód i gleb metalami ciężkimi (Kasztelewicz, Sypniowski, 2010 ; Karczewska, Kabała, 2010). Działalność górnictwa prowadzi również do powstania nowych form ukształtowania terenu

(wielkopowierzchniowe zagłębienia powstałe na skutek eksploatacji odkrywkowej oraz wzniesienia o znacznej wysokości względnej, będące wynikiem składowania skały pływnej), które zmieniają wykształcony w sposób naturalny krajobraz. Już w trakcie udostępniania złoża wykonuje się prace, których celem jest nadanie lub przywrócenie gruntom zdegradowanym albo zdewastowanym wartości użytkowych lub przyrodniczych po zaprzestaniu eksploatacji, zwane w świetle prawa rekultywacją, które kontynuowane są po zakończeniu działalności górniczej (Ustawa o ochronie gruntów rolnych i leśnych 1995). Podobnie jak sama eksploatacja, również

<sup>\*)</sup> Politechnika Wroclawska, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii

rekultywacja w sposób istotny przyczynia się do zmiany środowiska przyrodniczego.

Ze względu na coraz większy nacisk kładziony na aspekty związane z ochroną środowiska oraz zrównoważony rozwój, niezwykle ważne jest by monitoring zmian komponentów środowiska w obszarach górniczych prowadzony był stale, z możliwie jak najwyższą dokładnością. Działanie takie może wyeliminować lub w znacznym stopniu zmniejszyć ryzyko wystąpienia skutków niepożądanych na terenach wykraczających poza obszary górnicze czy też wspomóc sam proces rekultywacji. Jednakże rozległe rozmiary obszarów górniczych oraz ilość komponentów środowiska, które należy monitorować powodują, iż realizacja tego zadania jest czasochłonna i kosztowna. W związku z czym monitoring środowiska w obszarach trwającej jeszcze eksploatacji lub tych, w których prace wydobywcze zakończono, wykonywany jest w sposób pobieżny lub wręcz jest on zaniedbywany.

Wskazane powyżej trudności można wyeliminować wykorzystując do monitoringu komponentów środowiska systemy obrazowania satelitarne, które w ostatnich latach uległy rozwojowi w zakresie między innymi:

- podniesienia rozdzielczości przestrzennej obrazowań do wartości metrowych,
- udostępniania nieodpłatnie obrazowań użytkownikom cywilnym,
- umieszczania na pokładzie satelitów sensorów o niewielkiej masie, obrazujących w wielu kanałach spektralnych,
- skrócenia czasu rewizyty satelity do jednego bądź kilku dni (Kureczyński 2014).

Wymienione zmiany przyczyniły się do powstania nowego narzędzia jakim są indeksy środowiskowe, a więc proste działania algebraiczne na kanałach obrazu wielospektralnego, umożliwiające ocenę jakościową komponentów środowiska (Dworak i in. 2011).

Celem artykułu jest przedstawienie wyników badań prowadzonych w obszarach górniczych z wykorzystaniem indeksów środowiskowych opracowanych na podstawie wysokorozdzielczych obrazowań satelitarnych. Publikacja ma za zadanie wskazać spektrum problemów analizowanych przez środowisko naukowe za pomocą wskazanego narzędzia w obszarach czynnego lub dawnego wydobywania surowców. Ponadto prezentowane wyniki badań wskazują na najczęściej wykorzystywane w publikacjach indeksy oraz misje satelitarne, których obrazowania posłużyły do ich opracowania.

## 2. Przegląd wybranych indeksów środowiskowych

Do chwili obecnej opracowanych zostało wiele wskaźników, które służą do analizy stanu komponentów środowiska przyrodniczego. Na potrzeby niniejszej publikacji przyjęto następujący podział indeksów wyznaczanych na podstawie obrazowań wielospektralnych:

- wskaźniki wegetacji – na podstawie charakterystyki współczynnika odbicia pokrywy roślinnej możliwe jest określenie jej kondycji, temperatury, zawartości chlorofilu i węglowodanów, typu roślin ją tworzących oraz wiele innych właściwości (Xue, Su 2017),
- wskaźniki określające zawartość wody w glebie lub roślinności,
- wskaźniki geologiczne umożliwiające identyfikację różnych rodzajów skał i minerałów,
- wskaźniki przeznaczone do detekcji terenów, które uległy zniszczeniu w wyniku pożarów.

Wybrane wskaźniki należące do wymienionych grup umieszczono w tabelach 1-4 wraz z formułami umożliwiającymi ich wyznaczenie.

**Tabela 1. Przegląd wybranych wskaźników wegetacji**  
**Table 1. Review of selected vegetation indices**

Nazwa indeksu	Formuła	Źródło
Enhanced Vegetation Index (EVI)	$2.5 * \frac{(NIR-RED)}{(NIR+6*RED-7.5*BLUE+1)}$ (1)	(Karan i in. 2016)
Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	$\frac{NIR-RED}{NIR+RED}$ (2)	(Ma i in. 2017)
Simple Ratio (SR)	$\frac{NIR}{RED}$ (3)	(Ma i in. 2017)
Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)	$1.5 * \frac{(NIR-RED)}{(NIR+RED+0.5)}$ (4)	(Heute 1988)
Visible Atmospherically Resistant Index (VARI)	$\frac{GREEN-RED}{GREEN+RED-BLUE}$ (5)	(Gitelson i in. 2002)
Leaf Area Index (LAI)	$3.618 * EVI - 0.118$ (6)	(Boegh i in. 2002)
Green Leaf Index (GLI)	$\frac{GREEN-RED}{GREEN+RED-BLUE}$ (7)	(Louhaichi i in. 2001)
Modified Simple Ratio (MSR)	$\frac{\left(\frac{NIR}{RED}\right)-1}{\left(\frac{NIR}{\sqrt{RED}}\right)+1}$ (8)	(Ma i in. 2017)
Non-Linear Index (NLI)	$\frac{NIR^2-RED}{NIR^2+RED}$ (9)	(Ma i in. 2017)
	$-0.2787 * BLUE - 0.2174 * GREEN - 0.5508 * RED + 0.7221 * NIR + 0.0773 * SWIR1 - 0.1648 * SWIR2$ (10)	(Ma i in. 2017)

Uwaga:

- 1) NIR, RED, BLUE, GREEN, SWIR1, SWIR2 – współczynniki odbicia w kanałach spektralnych odpowiednio: bliskiej podczerwieni, kanale czerwonym, niebieskim, zielonym, podczerwieni krótkofalowej 1 i 2
- 2) Konstrukcja każdego ze wskaźników wymaga zapoznania się z kanałami, w których pracuje dany sensor optyczny

**Tabela 2. Przegląd wybranych wskaźników określających zawartość wody**  
**Table 2. Review of selected water content indices**

Nazwa indeksu	Formuła	Źródło
Normalized Difference Water Index (NDWI)	$\frac{GREEN-NIR}{GREEN+NIR}$ (11)	(Acharya i in. 2018)
Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)	$\frac{GREEN-SWIR}{GREEN+SWIR}$ (12)	(Xu 2006)
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)	$\frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}$ (13)	(Karan i in. 2016)
Automated Water Extraction Index (AWEI)	$4 * (GREEN - SWIR1) - (0.25 * NIR + 2.75 * SWIR1)$ (14)	(Acharya i in. 2018)

**Tabela 3. Przegląd wybranych wskaźników geologicznych**  
**Table 3. Review of selected geology indices**

Nazwa indeksu	Formuła	Źródło
Clay Minerals Ratio	$\frac{SWIR2}{NIR}$ (15)	(Mahboob i in. 2019)
Ferrous Minerals Ratio	$\frac{SWIR1}{NIR}$ (16)	
Iron Oxide Ratio	$\frac{RED}{BLUE}$ (17)	

**Tabela 4. Przegląd wybranych wskaźników umożliwiających detekcję obszarów zniszczonych w wyniku pożarów**

**Table 4. Review of selected indices enabling detection of areas damaged by fires**

Nazwa indeksu	Formuła	Źródło
Burn Area Index (BAI)	$\frac{1}{(0.1-RED)^2+(0.06-NIR)^2}$ (18)	(Chuvieco i in. 2002)
Burn Area Index Modified (BAIM)	$\frac{1}{(NIR-0.05*NIR)^2+(SWIR-0.2*SWIR)^2}$ (19)	(Fornacca i in. 2018)

### 3. Przegląd publikacji dotyczących badań komponentów środowiska naturalnego na obszarach pogórnich z wykorzystaniem indeksów środowiskowych

Niniejsze opracowanie ma za zadanie przybliżyć zagadnienia związane z badaniem komponentów środowiska naturalnego przy użyciu indeksów środowiskowych. W ramach tego zadania przeanalizowano szereg publikacji autorstwa polskich, jak i zagranicznych naukowców, wykorzystując bazę danych Scopus oraz słowa kluczowe: *mining*, *spectral indices* oraz *remote sensing*. Wśród 188 pozycji wybrano 20 do dalszych badań.

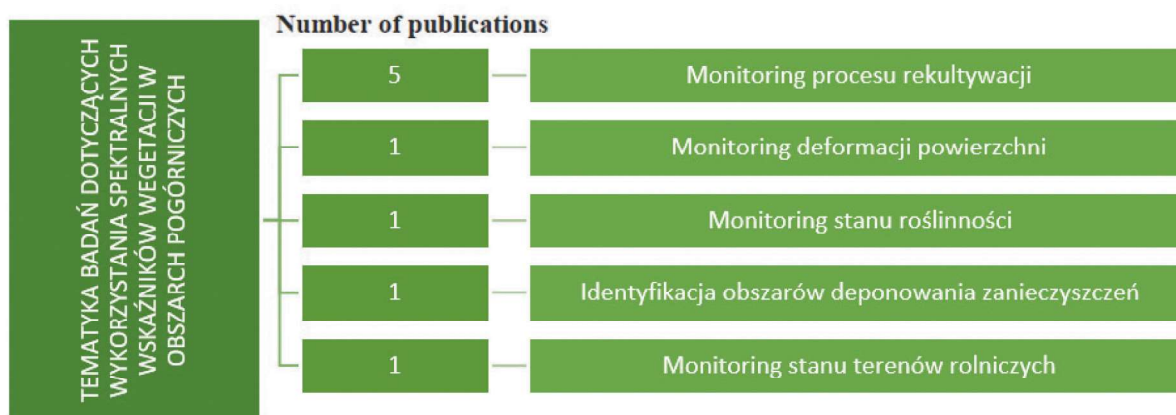
Wyniki analizy publikacji wskazują, iż społeczność naukowa w badaniach środowiska przyrodniczego na terenach pogórnich skupia się przede wszystkim na analizie kondycji flory, zawartości wody w glebie i pokrywie roślinnej, a także detekcji obszarów, na których nastąpiła sedimentacja określonego rodzaju minerałów. W związku z tym opublikowane do chwili obecnej materiały naukowe dotyczą przede wszystkim wykorzystania wskaźników wegetacji, geologicznych oraz tych umożliwiających analizę jakościową zawartości wody i do nich też zawężono przegląd literatury.

#### 3.1. Zastosowanie spektralnych wskaźników wegetacji w obszarach pogórnich

Tematyka badań dotyczących wykorzystania wskaźników wegetacji w obszarach wydobywania kopaliny lub tych, w których zaprzestano działalności górniczej jest niezwykle szeroka. Na rys. 1. przedstawiono tematykę badań prowadzonych z użyciem indeksów dedykowanych do oceny kondycji pokrywy roślinnej, ze wskazaniem ilości przeanalizowanych publikacji, które poruszały dany temat.

Najczęściej poruszonym tematem przez środowisko naukowe jest monitoring procesu rekultywacji polegający na analizie przestrzenno-czasowych zmian w zasięgu pokrywy roślinnej oraz jej kondycji. Jednym z przykładów badań dotyczących tego zagadnienia jest publikacja (Karan i in. 2016), w której analizom poddano florę w zreultywowanym bloku II obszaru wydobywania węgla kamiennego Jharia. Wykorzystując zobrazowania satelitów Landsat 5 i 8, opracowano trzy wskaźniki wegetacji (NDVI, EVI, RVI) oraz indeks umożliwiający analizę zawartości wody w roślinności (NDMI). Zastosowane narzędzia pozwoliły na identyfikację form pokrycia terenu w badanym obszarze wraz ze wskazaniem ich zmian w okresie ostatnich 15 lat oraz ocenę kondycji pokrywy





Rys. 1. Tematyka badań dotyczących wykorzystania spektralnych wskaźników wegetacji w obszarach pogórnicych  
Fig. 1. Research problems concerning the use of spectral vegetation indices on post-mining areas

roślinnej. Dodatkowo autorzy stwierdzili silną korelację między wskaźnikami NDVI i EVI a także pomiędzy NDVI i NDMI. Podobne badania wykonano na obszarze odkrywkowej kopalni węgla Wise County w USA (Li i in. 2015). Analizę kondycji roślinności dla okresu 27 lat przeprowadzono na podstawie wskaźnika NDVI, który zbudowano w oparciu o 20 zobrażeń satelitów Landsat o rozdzielczości przestrzennej 30 m oraz 6 zdjęć pozyskanych dzięki zastosowaniu Unmanned Aerial Vehicle (UAV). Wskaźnik NDVI stanowił również podstawowe narzędzie w monitoringu procesu rekultywacji w kopalni żelaza Lingbei (Li i in. 2018). Konstrukcję wskaźnika autorzy oparli o kanały czerwony i bliskiej podczerwieni zobrażeń satelitów Landsat i HJ-1B CCD, pozyskanych dla okresu 1990-2016.

Wyniki analizy kondycji roślinności oraz zmian jej zasięgu przestrzennego w oparciu o szeroką gamę wskaźników wegetacji przedstawiono w publikacji (Yao, Zhou 2016). Autorzy do badań wykorzystali 19 indeksów, w tym również EVI i NDVI, które opracowano w oparciu o powszechnie dostępne zobrażenia misji Landsat. Tym samym wykonano bogatą analizę jakościową omawianej formy użytkowania terenu w obrębie nieczynnej kopalni węgla kamiennego Antibaio. Wskaźnik wegetacji wykorzystano także na potrzeby monitoringu roślinności w obrębie nieczynnej kopalni azbestu położonej w centralnej części Cypru (Poyiadji 2018). Obszar dawnej działalności górniczej stanowi część Geoparku Światowego UNESCO – Troodos Geopark. Autorzy badań do monitoringu pokrywy roślinnej wykorzystali indeks NDVI opracowany na bazie zobrażeń europejskiego satelity teledektacyjnego Sentinel-2.

Kolejnym z problemów analizowanych przy użyciu spektralnych indeksów wegetacji w obszarach pogórnicych jest identyfikacja stref osiadań oraz miejsc degradacji roślinności (Padmanan i in. 2017). W oparciu o zobrażenia Landsat 7 z lat 2013-2016 skonstruowany został indeks NDVI. Na jego podstawie autorzy wyróżnili obszary, w których nastąpiły niekorzystne zmiany pokrywy roślinnej oraz wzrost powierzchni mokradła, co stanowiło skutek podniesienia poziomu zwierciadła wód gruntowych. W konsekwencji w zrehabilitowanym obszarze wydobycia węgla Kirchhellen Heide zidentyfikowano dwie strefy osiadań oraz stwierdzono wzrost powierzchni zbiorników wodnych.

Wykorzystanie indeksów wegetacji w kontekście bezpieczeństwa żywieniowego było przedmiotem publikacji (Matejcek, Kopackova 2010). Autorzy na podstawie zobrażeń satelitów Landsat 5 (1985-1990) i 7 (2000-2009) opracowali wskaźnik NDVI, który posłużył do analizy zmian

zasięgu przestrzennego pól uprawnych zlokalizowanych wokół czynnych i zrewitalizowanych obszarów wydobycia węgla brunatnego w północno-zachodnich Czechach. W artykule wskazano wyraźny wpływ sezonowości roślinności oraz lokalnych warunków meteorologicznych na wyniki analiz wykonywanych z użyciem zobrażeń satelitarnych.

Sedymencja osadów czy też pyłów na powierzchni pokrywy roślinnej powoduje zmianę współczynnika odbicia w poszczególnych kanałach spektralnych. Właściwość tę wykorzystano w pracy (Ma i in. 2017), w której to autorzy, korzystając z 8 wskaźników wegetacji (SR, NDVI, SAVI, TSAVI, PVI, NLI, MSR i TC<sub>greenness</sub>), zidentyfikowali ilość oraz rozkład przestrzenny pyłu zdeponowanego na liściach. Na podstawie badań laboratoryjnych oraz zobrażeń satelitarnych analizowano odpowiedzi spektralne roślinności w zależności od masy zgromadzonego pyłu. Uzyskane wyniki wskazują, iż wraz ze wzrostem ilości pyłu wzrasta współczynnik odbicia w kanale czerwonym, maleje on natomiast w kanale bliskiej podczerwieni. Badania wykazały ponadto, że indeksy wegetacji są liniowo lub logarytmicznie związane z masą pyłu odłożonego na powierzchni liści. Na koniec autorzy stwierdzili, iż wskaźniki SAVI, TSAVI, PVI, NLI i MSR nie nadają się do badań roślinności wysokiej oraz wielogatunkowej.

Szeregi czasowe indeksów wegetacji mogą posłużyć również do identyfikacji momentu rozpoczęcia działalności górniczej oraz okresu największej degradacji roślinności (Qianhan i in. 2018). W publikacji wykorzystano indeks NDVI, do którego konstrukcji posłużono się zobrażeniami Terra (2000-2018) oraz Landsat 5 i 7 (2003-2016). Analiza wartości indeksu w poszczególnych latach pozwoliła nie tylko na osiągnięcie wyznaczonego celu, ale także na określenie zmian zasięgu przestrzennego obszaru wydobycia węgla w Muli Town na przestrzeni niemalże 20 lat.

### 3.2. Zastosowanie spektralnych wskaźników geologicznych w obszarach pogórnicych

Zastosowanie spektralnych wskaźników geologicznych przyczynia się do detekcji zbiorników pochodzenia górniczego oraz identyfikacji obszarów, w których nastąpiła sedymencja określonej formacji skalnej lub minerałów. W związku z coraz szybszym rozwojem społeczeństwa i zwiększonym zapotrzebowaniem na surowce, pojawia się konieczność eksploracji Ziemi w celu identyfikacji nowych, potencjalnych pokładów złóż kopaliny. Wskaźniki geologiczne opracowane na podstawie wysokorozdzielczych zobrażeń

wielospektralnych dają szansę na realizację tego celu w sposób zdalny i ekonomiczny. Nic więc dziwnego, iż ich zastosowanie w omawianym kontekście jest coraz częściej przedmiotem badań. Dokonana analiza pozyskanego materiału naukowego pozwoliła na wyróżnienie następujących zagadnień, które były przedmiotem publikacji w latach 2010-2019:

- detekcja zbiorników wodnych powstałych na skutek prowadzonej działalności górniczej,
- identyfikacja obszarów mogących stanowić przyszłe miejsce eksploatacji surowca,
- określenie składu chemicznego formacji skalnych tworzących składowiska odpadów górniczych.

Zbiorniki wodne powstałe na skutek działalności górniczej (poprzez wypełnianie naturalnych zagłębień wodą podziemną w wyniku zmiany stosunków wodnych) cechują się istotną zawartością metali ciężkich. A zatem krzywe spektralne powstałe na skutek odbicia fali elektromagnetycznej od powierzchni zanieczyszczonego zbiornika będą różnić się od krzywych zarejestrowanych dla zbiorników, które metali ciężkich nie zawierają. Badania mające na celu identyfikację zbiorników pogórnich wśród istniejących akwenów zostały podjęte przez Mukherjee i in. Autorzy wykorzystując zobrażenia satelity Landsat 8 opracowali indeksy NDWI, *Bare Soil Index* (BI) oraz *Clay Minerals Ratio*. Pierwszy z wymienionych umożliwił detekcję zbiorników wodnych wśród innych form użytkowania terenu. Identyfikacja wspomaganą była przez indeks BI, który miał wyeliminować ryzyko błędnej interpretacji odsłoniętej gleby jako akwen. Realizację postawionego przez autorów celu umożliwił natomiast indeks *Clay Minerals Ratio* (Mukherjee i in. 2018). W 2019 roku autorzy podjęli kontynuację tych badań, wykazując, iż *Iron Oxide Ratio* pozwala na osiągnięcie wyższej dokładności identyfikacji zbiorników pogórnich niż *Clay Minerals Ratio* (Mukherjee i in. 2019).

Badanie składu chemicznego stanowiło również przedmiot badań (Hao i in. 2019). Jako obiekt analiz wybrano składowisko odpadów górniczych powstałe na skutek eksploatacji żelaza i miedzi w południowo-wschodniej części prowincji Hubei (Chiny). Na podstawie zobrażeń satelity Landsat 8 autorzy opracowali trzy własne indeksy: *all-band tailing index*, *modified normalized difference tailing index* (MNTI) oraz *normalized difference tailings index for Fe-bearing minerals* (NDTIFE), przy czym MNTI dostarczał informacje o zawartości anionów (karboaniony i hydroksyl), a NDTIFE o zawartości kationów (jonów żelazowych). Model powstały na bazie wymienionych wskaźników pozwolił na wydobycie danych na temat odpadów górniczych z dokładnością 84%.

Wskaźniki geologiczne najczęściej jednak wykorzystywane są na potrzeby identyfikacji potencjalnych miejsc eksploatacji danego surowca. Przykładem analiz tego rodzaju są badania prowadzone w obszarze górniczym Bau, na wyspie Borneo (Pour, Hashim 2014). Autorzy publikacji w oparciu o indeksy *Clay Minerals Ratio*, *ferric iron oxide index* oraz *ferrous iron oxide index*, a także transformację *Principal Components Analysis* (PCA) i *Linear Spectral Unmixing* (LSU) identyfikowali obszary zmienione hydrotermicznie na skutek mineralizacji złota. Wybrane do badań indeksy pozwoliły na realizację celu pomimo ograniczonej ekspozycji skał wynikającej z obecności bujnej roślinności tropikalnej. Analogicznym zagadnieniem na obszarze kopalni kaolinów Arazgonay, w północno-zachodnim Iranie, zajmowali się Safari M. i Manoucherinia M. (2018). Autorzy w badaniach wykorzystali trzy indeksy geologiczne, transformację PCA oraz metodę najmniejszych kwadratów, identyfikując tym samym miejsca akumulacji kaolinitu, alunitu i hematytu (Safari, Manouchehrinia 2018). Ten sam problem badawczy z wykorzystaniem PCA, indeksów geologicznych i kombinacji kanałów spektralnych stanowił przedmiot badań Mahboob i

in. (2019). Na podstawie zobrażeń satelity Landsat 8, pozyskanych dla sierpnia 2017 roku, opracowano następujące wskaźniki: *Clay Minerals Ratio*, *Iron Oxide Ratio*, *hydroxyl-bearing rock ratio* oraz *Ferrous Minerals Ratio*. Uzyskane wyniki wykazują zgodność z mapami geologicznymi opracowanymi przez Council for Geoscience South Africa, jak również podkreślają, iż kombinacje kanałów spektralnych są bardziej efektywną techniką identyfikacji potencjalnych miejsc eksploatacji niż indeksy geologiczne (Mahboob i in. 2019).

Zastosowanie kanałów SWIR1 (1.566-1651  $\mu\text{m}$ ) oraz SWIR2 (2.107-2.294  $\mu\text{m}$ ) zobrażeń satelity Landsat 8 pozwoliło Mukherjee i in. (2019) na konstrukcję własnego wskaźnika geologicznego umożliwiającego identyfikację obszarów o znacznej koncentracji węgla. W efekcie autorzy określili w sposób zdalny lokalizację granic, zarówno kopalni odkrywkowych, jak i składowisk odpadów, w indyjskim obszarze wydobywania Jharia. Porównanie uzyskanych wyników z wysokorozdzielczymi obrazami Google Earth oraz miarami statystycznymi dla okresu całego roku pozwoliło określić średnią dokładność zaproponowanej metody badawczej na poziomie 86.24% (Mukherjee i in. 2019).

### 3.3. Zastosowanie spektralnych wskaźników określających zawartość wody w obszarach pogórnich

Jednym z istotnych skutków prowadzenia prac wydobywczych jest obniżenie terenu o znacznym zasięgu przestrzennym. Monitoring osiadania powierzchni w sąsiedztwie kopalni węgla kamiennego Yanzhou, celem identyfikacji miejsc, w których pola uprawne są zalewane przez wody podziemne, stanowił przedmiot badań Li i in. Autorzy w ramach prowadzonych prac starali się również w sposób jednoznaczny stwierdzić czy proces zalewania jest efektem działalności górniczej czy też następuje na skutek zwiększonych opadów atmosferycznych. Badania prowadzono z użyciem czterech metod, w tym jednej wykorzystującej spektralny indeks MNDWI, opracowany na podstawie zobrażeń satelitów Landsat 5 i 8 (1990-2014). Na bazie uzyskanych wyników stwierdzono:

- wzrost powierzchni zbiorników wodnych powstałych na skutek wypełnienia wodą podziemną obniżonych fragmentów terenu,
- górnicze pochodzenie zbiorników wodnych,
- ogólną dokładność wskaźnika MNDWI na poziomie 94.7%, tym samym potwierdzając, iż wśród zaproponowanych metod, indeks ten stanowił najlepsze narzędzie (Li i in. 2017).

Tematykę monitoringu procesu osiadania z wykorzystaniem spektralnych indeksów (MNDWI) oraz zobrażeń satelitów Landsat poruszono także w publikacji (Zhang, Gao 2013).

Z kolei Yu i in. analizowali zmiany w zasięgu przestrzennym rzek w latach 2002-2014 położonych w pobliżu kopalni węgla kamiennego Xinijang. Swoje badania autorzy oparli o dwa spektralne wskaźniki: MNDWI oraz *Blue and Near Infrared Band based Water Index* (BNWI) opracowane na podstawie zobrażeń satelitów Landsat 5 i 8. Otrzymane wyniki potwierdziły, iż analizowane ciekły wodne zmniejszyły swoją powierzchnię. Ogólna dokładność metody wykorzystanej w badaniach wyniosła ponad 90% (Yu i in. 2016).

Ostatnim z analizowanych artykułów w omawianym kontekście jest publikacja (Sun, Chen 2016) stanowiąca przykład wykorzystania indeksów spektralnych do określenia wilgotności gleby w obrębie odkrywkowej kopalni żelaza Nanfen w Chinach. Autorzy w artykule posłużyli się zobrażeniami satelitów Landsat z lat 2002, 2006, 2010 oraz 2014 w celu



opracowania *Soil Moisture Monitoring Index* (SMMI), bazującego na kanałach krótkiej i bliskiej podczerwieni. Ponadto w pracy wykorzystano wskaźnik NDVI, którego użycie miało na celu weryfikację uzyskanych wyników.

#### 4. Podsumowanie

Niniejsza publikacja stanowi podsumowanie badań prowadzonych przez środowisko naukowe w latach 2010-2019, których celem była analiza zmian komponentów środowiska naturalnego w obszarach pogórnicych z zastosowaniem indeksów środowiskowych opracowanych na podstawie wysokorozdzielczych, satelitarnych zobrażeń wielospektralnych. Wyniki uzyskane z przeglądu materiału naukowego świadczą o szerokim spektrum problemów, które badać można z użyciem spektralnych wskaźników. Indeksy środowiskowe posłużyły do analizy, w obszarach pogórnicych, takich zjawisk jak: wilgotność gleby, identyfikacja stref osiadań, monitoring procesu rekultywacji, detekcja obszarów przekształconych hydrotermicznie w związku z mineralizacją danego surowca czy też zmiany zasięgu przestrzennego rzek. Podkreślić należy, iż oprócz powszechnie znanych indeksów, publikacje zawierały również wyniki uzyskane w oparciu o nowo opracowane wskaźniki, co było rezultatem problematyki i tematyki prowadzonych badań.

Wśród opracowanych spektralnych wskaźników środowiskowych można wyróżnić te, które najczęściej wybierane są do analiz komponentów środowiska naturalnego. Niniejszy przegląd literatury potwierdza, iż najczęściej wykorzystywanym indeksem wegetacji jest NDVI. Wskaźnik ten stanowił bowiem narzędzie badań we wszystkich analizowanych artykułach. Istotnym instrumentem w monitoringu pokrywy roślinnej okazał się również indeks EVI, dostarczający informacje na temat zmian strukturalnych flory (w tym gatunków roślinności, ilości zielonych liści przypadających na jednostkę powierzchni, itp.), uzupełniający dane uzyskane z interpretacji wartości NDVI. Do analiz związanych z zawartością wody w środowisku, społeczność akademicka z reguły wykorzystywała MNDWI oraz NDWI, aspekty geologiczne natomiast szczególnie często badano przy użyciu *Clay Minerals Ratio*, *Iron Oxide Ratio* oraz *Ferrous Minerals Ratio*.

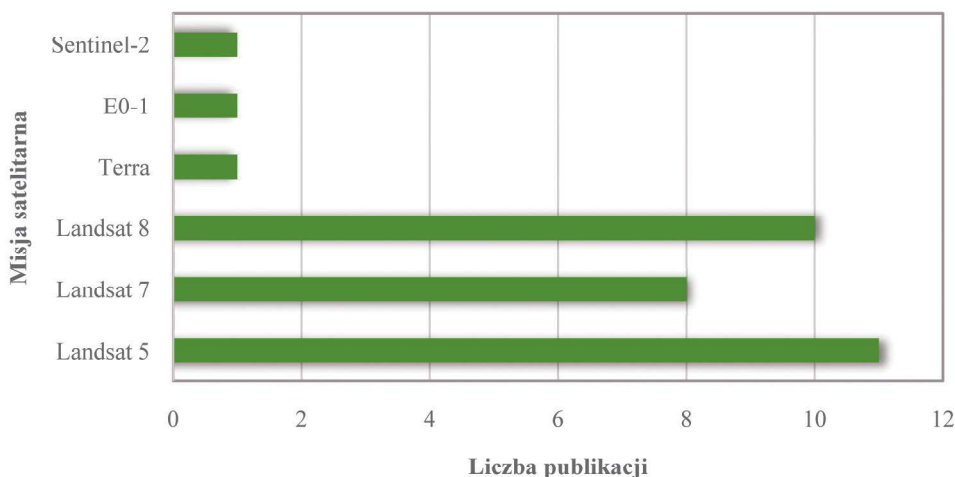
Analizując pozyskany materiał naukowy pod kątem misji satelitarnych wykorzystanych do opracowania spektralnych

indeksów środowiskowych, można stwierdzić, iż w 90% przytoczonych publikacji skorzystano z kanałów spektralnych zobrażeń systemu Landsat. W artykułach wykorzystano informacje zarejestrowane przez sensory optyczne kilku misji systemu: Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper + (ETM+) oraz Operational Land Imager (OLI). Poza misją Landsat w publikacjach wykorzystano również zobrażenia zarejestrowane przez sensory: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (satelita Terra), Advanced Land Imager (satelita E0-1) i MultiSpectral Instrument (satelita Sentinel-2). Na rys. 2. przedstawiono szczegółowe informacje na temat misji satelitarnych, których zobrażenia umożliwiły realizację analizowanych badań.

Pomimo szerokiego wachlarza możliwości oferowanych przez spektralne indeksy środowiskowe, podkreślenia wymaga fakt, iż stanowią one proste wyrażenie algebraiczne na kanałach obrazu wielospektralnego, które w przypadku bardziej skomplikowanych środowisk może dawać nieprawidłowe wyniki. Fakt ten jest szczególnie widoczny w przypadku wskaźników wegetacji. A zatem opracowanie spektralnego indeksu powinno wiązać się z zastosowaniem technik oraz algorytmów, które mogłyby wpłynąć na podniesienie dokładności uzyskiwanych rezultatów.

#### Literatura

- ACHARYA T.D., SUBEDI A., LEE D.H. 2018 - Evaluation of water indices for surface water extraction in a Landsat 8 scene of Nepal. *Sensors*. T. 18, z. 8.
- BOEGH E., SOEGAARD H., BROGEN N., HASAGER C.B., JENSEN N.O., SCHELDE K., THOMSEN A. 2002 - Airborne multispectral data for quantifying leaf area index, nitrogen concentration and photosynthetic efficiency in agriculture. *Remote Sensing of Environment*. T. 81, s. 179-193.
- CHUVIECO E., MARTÍN M.P., PALACIOS A. 2002 - Assessment of different spectral indices in the red-near-infrared spectral domain for burned land discrimination. *International Journal of Remote Sensing*. T. 23, z. 23, s. 5103-5110.
- DWORAK T.Z., HEJMANOWSKA B., PYKA K. 2011 - Problemy teledetekcyjnego monitoringu środowiska. *Wydawnictwa AGH, Kraków*. T. 2, s. 63-64.



Rys. 2. Misje satelitów teledetekcyjnych, których zobrażenia zostały wykorzystane w analizowanych publikacjach

Fig. 2. Remote sensing satellite missions, which images were used in analysed publications

- FORNACCA D., REN G., XIAO W. 2018 - Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a mountainous region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*. T. 10, s. 1196-1217.
- GITELSON A.A., STARK R., GRITS U., RUNDQUIST D., KAUFMAN Y., DERRY D. 2002 - Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for remote estimation of vegetation fraction. *International Journal of Remote Sensing*. T. 23, z. 13, s. 2537-2562.
- HAO L., ZHANG Z., YANG X. 2019 - Mine tailing extraction indexes and model using remote-sensing images in southeast Hubei Province. *Environmental Earth Sciences*. T. 78, z. 15, s. 492-503.
- HEUTE A.R. 1988—A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. T. 28, s. 295-309.
- KARAN S.H., SAMADDER S.R., MAITI S.K. 2016 - Assessment of the capability of remote sensing and GIS techniques for monitoring reclamation success in coal mine degraded lands. *Journal of Environmental Management*. T. 182, s. 272-283.
- KARCZEWSKA A., KABAŁA C. 2010 - Gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi i arsenem na Dolnym Śląsku – potrzeby i metody rekultywacji. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu*. T. 576, s. 59-79.
- KASZTELEWICZ Z., SYPNIEWSKI SZ. 2010 - Górnictwo odkrywkowe a rekultywacja terenów pogórnicznych (cz. 2). *Problemy Ekologii*. T. 14, z. 2, s. 74-84.
- KURCZYŃSKI Z. 2014 - *Fotogrametria*. Wydawnictwo Naukowe PWN SA. Warszawa.
- LI H., LEI J., WU J. 2018 - Analysis of land damage and recovery process in rare earth mining area based on multi-source sequential NDVI. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. T. 34, z. 1, s. 232-240.
- LI J., SHEN Y., JIAO L., YANG Z., WU Y. 2017 - Dynamic monitoring of water areas in Yanzhou coalfield based on Landsat TM/OLI images. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. T. 33, z. 18, s. 243-250.
- LI J., ZIPPER C.E., LI S., DONOVAN P.F., WYNNE R., OLIPHANT A., XIA Q. 2015 - Character analysis of mining disturbance and reclamation trajectory in surface coal-mine area by time-series NDVI. *Nongye Gongcheng Xuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. T. 31, z. 16, s. 251-27.
- LOUHAICHI M., BORMAN M.M., JOHNSON D.E. 2001 - Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*. T. 16, z. 1, s. 65-70.
- MA B., PU R., WU L., ZHANG S. 2017 - Vegetation index differencing for estimating foliar dust in an ultra-low-grade magnetite mining area using Landsat imagery. *IEEE Access*.
- MAHBOOB M.A., GENC B., CELIK T., ALI S., ATIF I. 2019 - Mapping hydrothermal minerals using remotely sensed reflectance spectroscopy data from Landsat. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. T. 119, s. 279-289.
- MATEJICEK L., KOPACKOVA V. 2010 - Changes in croplands as a result of large scale mining and the associated impact on food security studied using time-series Landsat images. *Remote Sensing*. T. 2, z. 6.
- MUKHERJEE J., MUKHOPADHYAY J., CHAVRAVARTY D. 2018 - Investigation of seasonal separation in mine and non mine water bodies using local feature analysis of Landsat 8 OLI/TIRS images. *IEEE*, s. 8961-8964.
- MUKHERJEE J., MUKHERJEE J., CHAVRAVARTY D. 2019 - Automated seasonal separation of mine and non mine water bodies from Landsat 8 OLI/TIRS using clay mineral and iron oxide ratio. *IEEE*, s. 2550-2556
- MUKHERJEE J., MUKHERJEE J., CHAVRAVARTY D., AIKAT S. 2019 - A novel index to detect opencast coal mine areas from Landsat 8 OLI/TIRS. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. T. 12, z. 3, 891-897.
- QIANHAN W., LIU K., SONG C., WANG J., KE L., MA R., ZHANG W., PAN H., DENG X. 2018 - Remote sensing detection of vegetation and landform damages by coal mining on the Tibetan Plateau. *Sustainability*. T. 10, z. 11.
- PADMANABAN R., BHOWMIK A.K., CABRAL P. 2017 - A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area. *International Journal of Geo-Information*. T. 401, z. 6, s. 401-415.
- POUR A.B., HASHIM M. 2014 - Alteration mineral mapping using ETM+ and hyperion remote sensing data at Bau Gold Field, Sarawak, Malaysia. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. T. 18.
- POYIADJI E., STEFOULI M., PRZYUCKA M., WOŁKOWICZ S., KOWALSKI Z., HADJIGEORGIOU C., WOROSZKIEWICZ M. 2018 - Introduction of remote sensing methods for monitoring the under restoration Amiantos Mine, Cyprus. *SPIE*.
- SAFARI M., MANOUCHEHRINIA M. 2018 - Targeting mineral associated with hydrothermal alteration zones using remote sensing techniques and field data in the Arazgonay Mining Area, North West Iran. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. T. 10, z. 10, s. 1790-1798.
- SUN L., CHEN D. 2016 - The application of remote Sensing technology in opencast soil Moisture inversion. *Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS)*.
- Ustawa** o ochronie gruntów rolnych i leśnych z dnia 3 lutego 1995 r. (Dz.U. 1995 Nr 16 poz. 78).
- XU H. 2006 - Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*. T. 27, z. 14, s. 3025-3033.
- XUE J., SU B. 2017 - Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications. *Journal of sensors*. T. 1, s. 1-17.
- YAO Z., ZHOU W. 2016 - Correlation analysis between vegetation fraction and vegetation indices in reclaimed forest: A case study in Pingshuo mining area. *IEEE Access*.
- YU S., SUN L., SUN Z., WU M. 2016 - Water body extraction and change analysis based on Landsat image in Xinjiang coal-mining regions. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
- ZHANG H., GAO Y. 2013 - The dynamic monitoring of coal mining seepers subsidence district based on RS and GIS technology – A case study of Huainan city. *Applied Mechanics and Materials*. T. 256-259, s. 2311-2314.

Artykuł wpłynął do redakcji – listopad 2019  
Artykuł akceptowano do druku – 25.01.2020