

Przebieg klęski ekologicznej w Karkonoszach i Górach Izerskich na podstawie analizy zdjęć satelitarnych Landsat

Jarocińska Anna¹⁾, Zagajewski Bogdan¹⁾, Ochtyra Adrian^{1,2)}, Marcinkowska Adriana¹⁾, Marlena Kycko¹ & Piotr Pabjanek¹⁾

¹⁾ Uniwersytet Warszawski, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Zakład Geoinformatyki, Kartografii i Teledetekcji, ajarocinska@uw.edu.pl

²⁾ Uniwersytet Warszawski, Kolegium Międzywydziałowych Indywidualnych Studiów Matematyczno-Przyrodniczych

WSTĘP

Od lat 1960. pogarszały się warunki i stan roślinności Karkonoszy. Było to spowodowane początkowo wielowiekową gospodarką leśną, gdzie w miejsca wylesione zasadzano monokultury świerkowe, czego skutkiem było zastąpienie świerkiem zarówno mieszanych lasów pogórza, jak i bukowego regla dolnego, co zakłóciło stabilność całego ekosystemu. W latach 1980. i 1990. nastąpiło zamieranie drzewostanów spowodowane m.in. skażeniem powietrza docierającego z nad obszarów przemysłowych, silnymi wiatrami, a wzmocnione dodatkowo gradacyjnym rozwojem szkodników (DANIELEWICZ i in. 2013). W całych Sudetach klęska ekologiczna objęła około 15 tys. ha (RAJ 1992). W roku 1982 ogłoszono stan klęski ekologicznej w dawnym województwie jeleniogórskim. Po ustąpieniu zagrożenia środowiska zanieczyszczeniami atmosfery nastąpiło odnawianie powierzchni pokłeskowych, jak również realizacje programów rewitalizacji lasu. Pod koniec lat 80. wykonywano znaczne cięcia sanitarne w celu usunięcia martwych drzewostanów, natomiast od około 2000 roku nastąpiło niemal całkowite odnowienie powierzchni pokłeskowych. Ocenia się, że zbiorowiska leśne ulegają stałej regeneracji oraz stabilizacji (RAJ & ZIENTARSKI 2004). Tereny górskie cechują się dużymi deniwelacjami i utrudnio-

nym dostępem eksploracyjnym, dlatego warto bazować na zdalnych technikach i metodach badawczych. Sensory lotnicze i satelitarne rejestrują widmo elektromagnetyczne, które pozwala identyfikować dużą liczbę składowych środowiska przyrodniczego (JAROCIŃSKA 2011, 2012, 2014; JAROCIŃSKA & ZAGAJEWSKI 2009; MARCINKOWSKA i in. 2014; ZAGAJEWSKI 2010). Celem niniejszej pracy była analiza stanu roślinności Karkonoszy i Gór Izerskich na podstawie zdjęć satelitarnych Landsat, oszacowanie dynamiki odnowy roślinności, a także wyznaczenie obszarów i terminów, w którym stan kondycyjny uzyskał optymalne zakresy.

Obszar badań obejmuje polską i czeską część Karkonoszy oraz Gór Izerskich (w granicach między 50°59' a 50°23'N oraz pomiędzy 14°21' a 16°25'E).

DANE SATELITARNE LANDSAT I TELEDETEKCYJNE WSKAŹNIKI ROŚLINNOŚCI

Landsat jest to program zdalnego pozyskiwania obrazów Ziemi z kosmosu, zarządzany przez National Aeronautics and Space Administration (NASA) oraz United States Geological

Survey (USGS). Obrazy satelitów tej serii pozyskiwane są ciągle od roku 1972, co pozwala na przeprowadzanie na ich podstawie analiz wieloczasowych. Satelity Landsat wykonują zobrazenie tego samego obszaru z 16-dniową częstotliwością, natomiast pojedyncza scena obejmuje obszar 185 x 185 km (Tab. 1).

Obecnie dostępne są wszystkie archiwalne dane oraz aktualnie pozyskiwane obrazy przez najnowszy sensor Landsat Operational Land Imager / Thermal InfraRed Sensor (OLI/ TIRS).

Wskaźnik zieleni *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) wykorzystuje kontrast między wysokim odbiciem w bliskiej podczerwieni i maksymalną absorpcję przez chlorofil w zakresie światła czerwonego (ROUSE i in. 1973):

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}}$$

Wykorzystywany jest od lat do badania kondycji roślinności, intensywności wegetacji i pokrycia gleby przez rośliny. Umożliwia oszacowanie strat w pokrywie roślinnej wskutek pożaru (HEMANDEZ CLEMENTE i in. 2006; WALCZYKOWSKI i in. 2012), jak też reakcję na różnego rodzaju czynniki stresowe (TELESCA & LASAPONARA 2006). Wskaźnik NDVI służy także do oceny stanu lasów, które zagrożone są przez szkodniki (BONNEAU i in. 1999; ZAWIŁA-NIEDŹWIECKI & WIŚNIEWSKA 2004; ZARZECKI & PASIERBIŃSKI 2009).

Zmodyfikowaną wersją wskaźnika NDVI jest *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI, HUETE 1988). SAVI eliminuje wpływ tła glebowego na sygnał, ale jest mniej wrażliwy niż NDVI na zawartość chlorofilu. Im wyższą wartość przyjmuje tym większą część powierzchni terenu pokrywa roślinność. Wskaźnik obliczany jest ze wzoru:

$$SAVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED} + L} \times (1 + L)$$

Wykorzystywany był do oceny wpływu człowieka na roślinność (ARAUJO i in. 2000) oraz do analizy stanu lasów (HALL i in. 2003).

Aby ocenić ilość wody w roślinach wykorzystano wskaźnik *Moisture Stress Index* (HUNT & ROCK 1989). MSI stosuje się przede wszystkim do badania wpływu stresu wodnego na stan roślin (VOGELAMANN & ROCK 1986; HUNT i in. 1987). Obliczając wartości MSI wykorzystywane są informacje o odbiciu w zakresie bliskiej oraz środkowej podczerwieni (Rock i in. 1986), wzór:

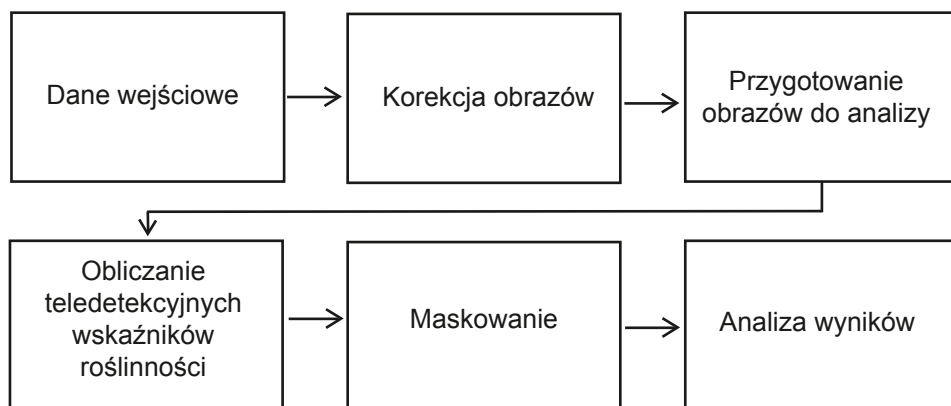
$$MSI = \frac{R_{MIR}}{R_{NIR}}$$

Dla zielonych części roślin wartość tego wskaźnika mieści się w przedziale od 0,4 do 2. Wraz ze wzrostem zawartości wody w liściach wzrasta w tym zakresie po-

Satelita	Data wystrzelenia	Data zakończenia pracy	Instrument / rozdzielczość przestrzenna
Landsat 1	23 lipca 1972	6 stycznia 1978	RBV: 80 m, MSS: 60 m (MS ¹)
Landsat 2	21 stycznia 1975	25 lutego 1982	RBV: 80 m, MSS: 60 m (MS)
Landsat 3	5 marca 1978	21 marca 1983	RBV: 40 m (PAN ²), MSS: 80 m (MS)
Landsat 4	16 lipca 1982	14 grudnia 1993	MSS: 80 m (MS), TM: 30 m (MS) i 120 m (IR ³)
Landsat 5	1 marca 1984	18 listopada 2012	MSS: 80 m (MS), TM: 30 m (MS) i 120 m (IR)
Landsat 6	5 października 1993	nie osiągnął orbity	ETM: 15 m (PAN), 30 m (MS) i 120 m (IR)
Landsat 7	15 kwietnia 1999	18 listopada 2012	ETM+: 15 m (PAN), 30 m (MS) i 60 m (IR)
Landsat 8	11 lutego 2013	obecnie funkcjonuje	OLI: 15 m (PAN), 30 m (MS, IR); TIRS: 100 m

¹ MultiSpectral – sensor wielospektralny. ² Panchromatic – kanał panchromatyczny. ³ InfraRed – kanał podczerwony.

Tab. 1. Zestawienie satelitów Landsat wraz z ich charakterystykami.



Ryc. 1. Schemat postępowania badawczego.

chłanianie promieniowania. Dlatego też niskie wartości wskaźnika MSI charakterystyczne są dla liści o wysokiej zawartości wody (VOGELMANN & MOSS 1993).

METODA BADAWCZA

Badania rozpoczęły się od wyboru najlepszych jakościowo obrazów z podobnego okresu fenologicznego zarejestrowanego w różnych latach. Pozyskane obrazy poddane zostały weryfikacji poprawności geometrycznej, następnie wykonana została korekcja radiometryczna, obliczono teledetekcyjne wskaźniki roślinności, wymaskowano chmury oraz przeprowadzono szczegółowe analizy statystyczne rozkładu badanych wskaźników (Ryc. 1).

Dane pobrano w formie zgeometryzowanych obrazów cyfrowych w formacie GeoTIFF ze strony GLOVIS (dostawcy danych Landsat¹). Do analiz obszaru Karkonoszy oraz Gór Izerskich wykorzystano łącznie pięć scen z sensorów: TM (*Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper+*) oraz OLI/TIRS (*Operational Land Imager / Thermal InfraRed Sensor*). Wybrano następujące obrazy:

- Landsat 5 TM z 11 lipca 1984 r.,
- Landsat 5 TM z 25 lipca 1992 r.,
- Landsat 7 ETM+ z 21 lipca 2002 r.,

- Landsat 5 TM z 3 lipca 2010 r.,
- Landsat 8 OLI/TIRS z 27 lipca 2013 r.,

Terminy wybrano tak, aby dane odzwierciedlały podobny etap wegetacji i były możliwie mało zachmurzone.

Wstępne przetwarzanie danych

W przypadku terenów górskich pierwszym i niezbędnym elementem przetwarzania danych jest korekcja atmosferyczna oraz topograficzna. W tym celu wykorzystano oprogramowanie ATCOR 2/3. Do wykonania korekcji topograficznej posłużono się Numerycznym Modelem Terenu GDEM V2 (*Global Digital Elevation Model Version 2*), o rozdzielczości przestrzennej wynoszącej 30 m, opracowanym na podstawie stereopar obrazów z sensora ASTER².

Po wykonaniu korekcji atmosferycznej i topograficznej kolejnym etapem pracy było dopasowanie wielkości sceny do obszaru Karkonoszy i Gór Izerskich.

Analiza stanu roślinności

Po wykonaniu wstępnych przetworzeń obliczono teledetekcyjne wskaźniki roślinności związane z parametrami biofizycznymi roślin. W pierwszym podejściu skoncentrowano się na NDVI, który uzyskuje wyższe wartości, im większa jest intensywność wegetacji pokrywy roślinnej (GLENN i in. 2008). Dla każdego z badanych okresów obliczono wskaźniki roślinności

¹<http://glovis.usgs.gov/>

²www.asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp

NDVI, SAVI i MSI wg zamieszczonych wzorów odpowiednich dla sensora i podzielono je na klasy w zależności od wartości tak, aby reprezentowały one odmienny stan pokrywy roślinnej.

Obliczając wartości wskaźnika, wykorzystano maksymalne odbicie z zakresu bliskiej podczerwieni i minimalne z czerwonego zakresu widma według

$$NDVI = \frac{\text{band 4} - \text{band 3}}{\text{band 4} + \text{band 3}} \quad \text{wonego zakresu widma według wzoru:}$$

$$NDVI = \frac{\text{band 5} - \text{band 4}}{\text{band 5} + \text{band 4}} \quad \text{dla Landsat TM, ETM+,}$$

$$SAVI = \frac{\text{band 4} - \text{band 3}}{\text{band 4} + \text{band 3} + L} \times (1 + L) \quad \text{dla Landsat TM, ETM+,}$$

dla OLI/TIRS.

$$MSI = \frac{\text{band 5}}{\text{band 4}} \quad \text{dla Landsat TM, ETM+,}$$

$$MSI = \frac{\text{band 6}}{\text{band 5}} \quad \text{dla OLI/TIRS}$$

Po obliczeniu teledetekcyjnych wskaźników roślinności dla każdego z terminów badawczych, wykonane zostało maskowanie chmur oraz obszarów nieporośniętych roślinnością (np. zabudowa) przy użyciu teledetekcyjnego wskaźnika roślinności NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*. Przyjęto, że poniżej wartości wskaźnika 0,2 oznaczają teren niepokryty roślinnością. Maski obszarów nieporośniętych roślinnością z poszczególnych lat połączono w jedną warstwę informatyczną, by wyłączyć identyczne obszary ze wszystkich analizowanych obrazów. Statystyki liczone były wyłącznie w obrębie Karkonoszy i Gór Izerskich. Końcową analizą jest porównanie wartości stanu struktur tkanek komórkowych i zdolności absorpcji promieniowania (wskaźnik NDVI) z roku 1984 i 2013. Wartości NDVI z roku 2013 zostały odjęte od wartości z roku 1984 dla każdego piksela. W ten sposób wartości ujemne oznaczają spadek stanu kondycyjnego, a dodatnie wzrost wartości, a tym samym polepszenie kondycji roślinności. Następnie podzielono obraz na klasy brak zmian (maksymalny spadek lub wzrost wartości NDVI o 0,1), polepszenie kondycji (wzrost wartości NDVI o ponad 0,1) i pogorszenie kondycji roślinności (spadek wartości NDVI o więcej niż 0,1).

Wynikiem analiz były mapy rozkładu wskaźników NDVI, SAVI, MSI, NDII dla każdego analizowanego okresu badawczego. Analizy statystyczne zostały przeprowadzone wyłącznie dla wyciętego z obrazu obszaru Karkonoszy i Gór, natomiast mapy rozkładu wskaźników przedstawiają całość terenu.

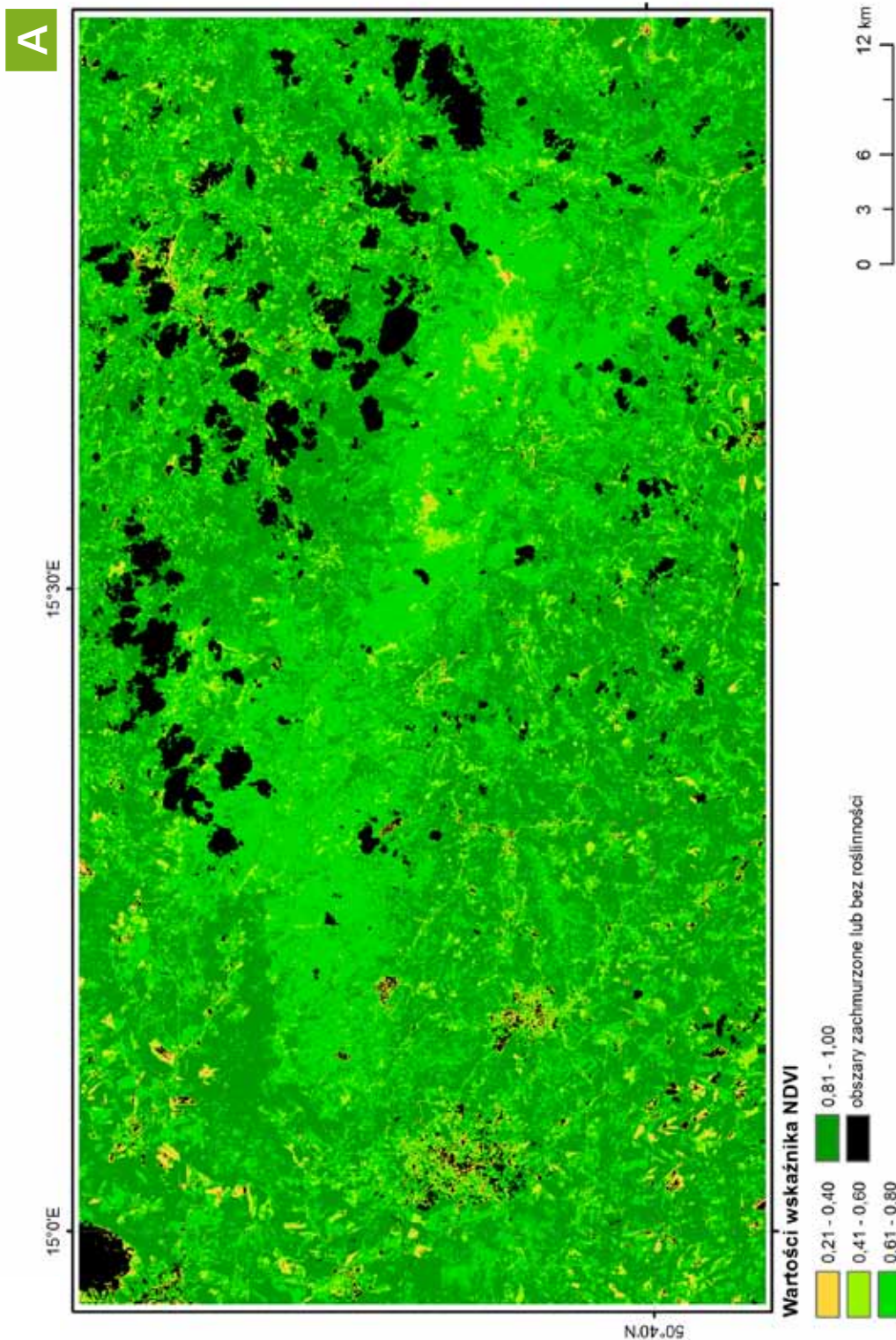
Na podstawie zmian wartości wskaźnika NDVI można stwierdzić, że kondycja roślinności zmieniała się w przeciągu lat.

Na rycinie 2 przedstawione są rozkłady wartości wskaźnika w kolejnych okresach badawczych. Wartości zostały przypisane do klas. Wartości między 0,21 do 0,4 to obszary porośnięte rzadką pokrywą roślinną lub roślinami w złej kondycji. Przyjmuje się, że wartości między 0,41 a 0,6 to roślinności w przeciętnej kondycji, między 0,61 a 0,8 – w dobrej, a od 0,81 do 1 w bardzo dobrej.

Na podstawie analiz można stwierdzić, że w latach 1984 i 1992 kondycja roślinności była dość dobra. Zdecydowane polepszenie kondycji było zaobserwowane w roku 2002. W roku 2010 i 2013 zaobserwowana kondycja roślinności nieco była nieco gorsza niż w roku 2002.

Zaprezentowane statystyki policzono jedynie dla obszaru polskiej części Karkonoszy i Gór Izerskich (Ryc. 3). Na podstawie szczegółowych analiz można stwierdzić, że w roku 1984 kondycja jest najgorsza, a jednak 55% badanej roślinności ma dobrą kondycję, a 40% bardzo dobrą. W roku 1992 nieco mniej jest powierzchni roślinności o dobrej kondycji, a zwiększył się udział roślinności o bardzo dobrej kondycji. Wyraźnie najlepsza kondycja roślinności była w roku 2002, gdzie 75% obszaru pokrywała roślinność w bardzo dobrej kondycji. Nie wielkie pogorszenie kondycji wystąpiło w roku 2010 (większy – 43%, udział klasy NDVI o wartościach między 0,61 a 0,8), a w roku 2013 była ponownie nieco lepsza (37% roślinności było w klasie NDVI między 0,61 a 0,8, a 60% w klasie powyżej 0,81). W tych dwóch okresach kondycja roślinności była bardzo zbliżona, jednocześnie wyraźnie lepsza niż w okresach wcześniejszych (1984 i 1992).

Dość zbliżone wnioski uzyskano na podstawie wartości wskaźnika *Soil Adjusted Vegetation Index*. Ryc. 4 przedstawia rozkład wartości wskaźnika w roku 2013, natomiast Ryc. 5 –



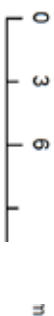
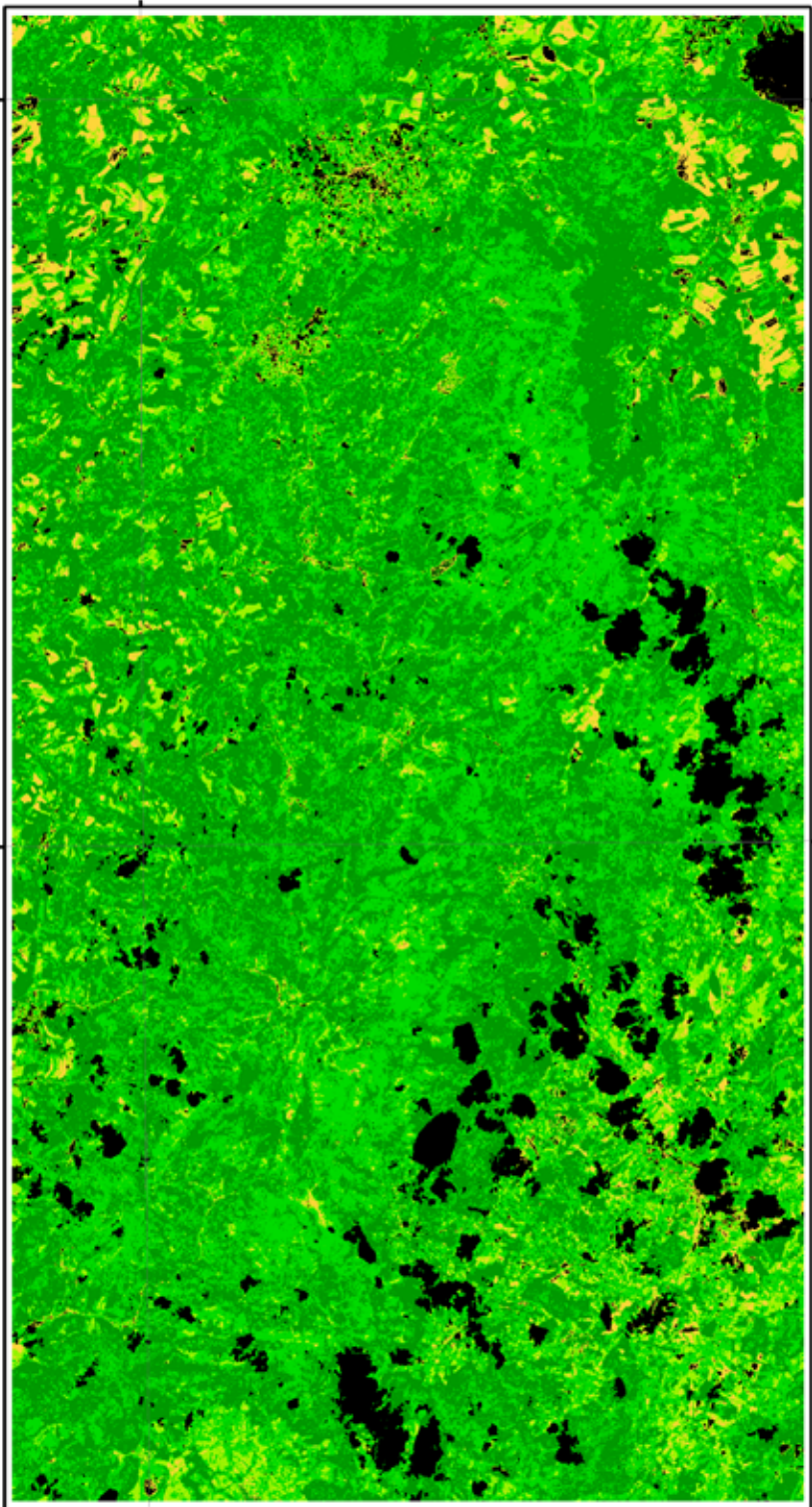
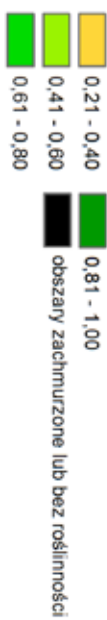
B

15°0'E

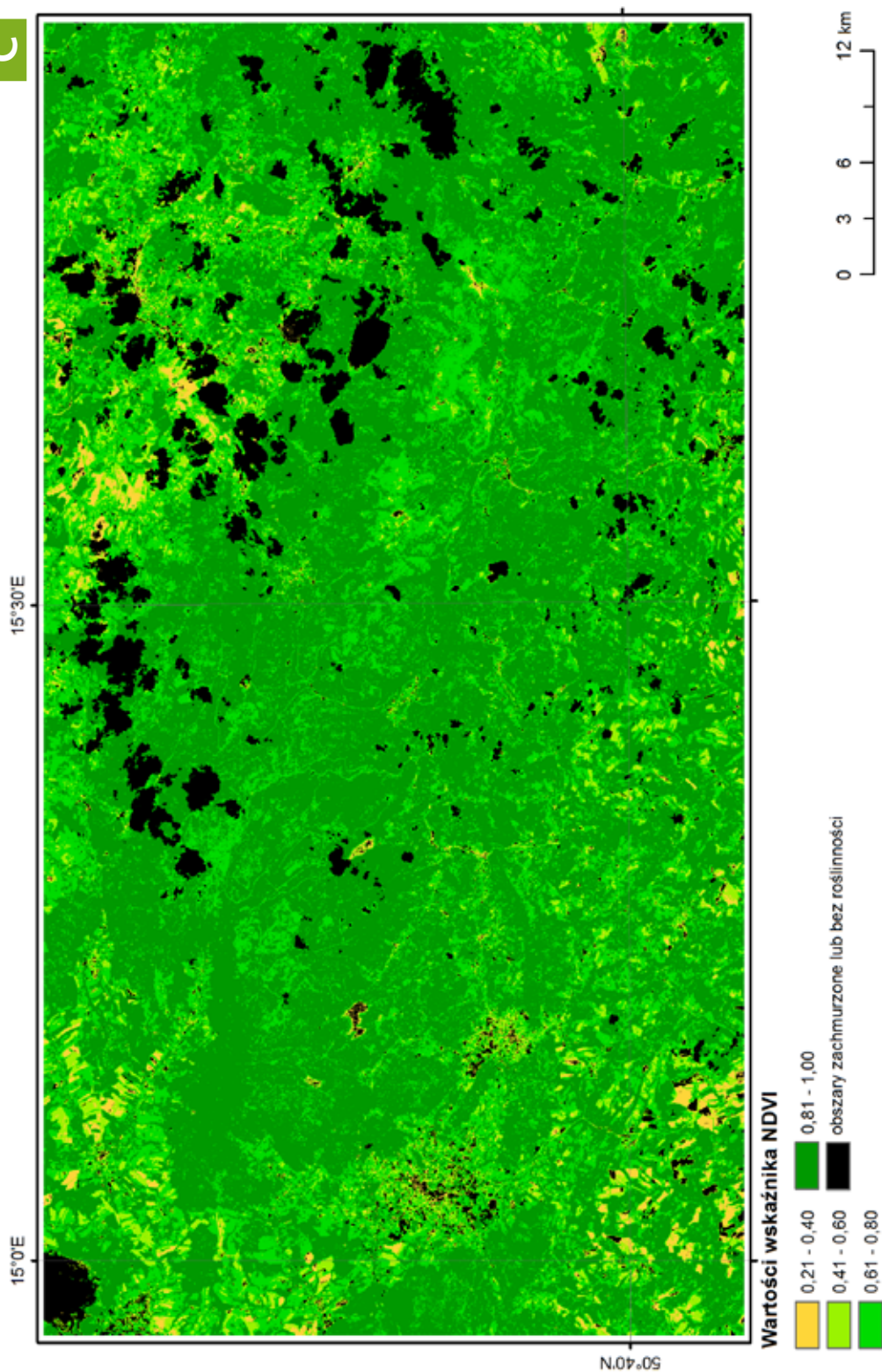
15°30'E

50°40'N

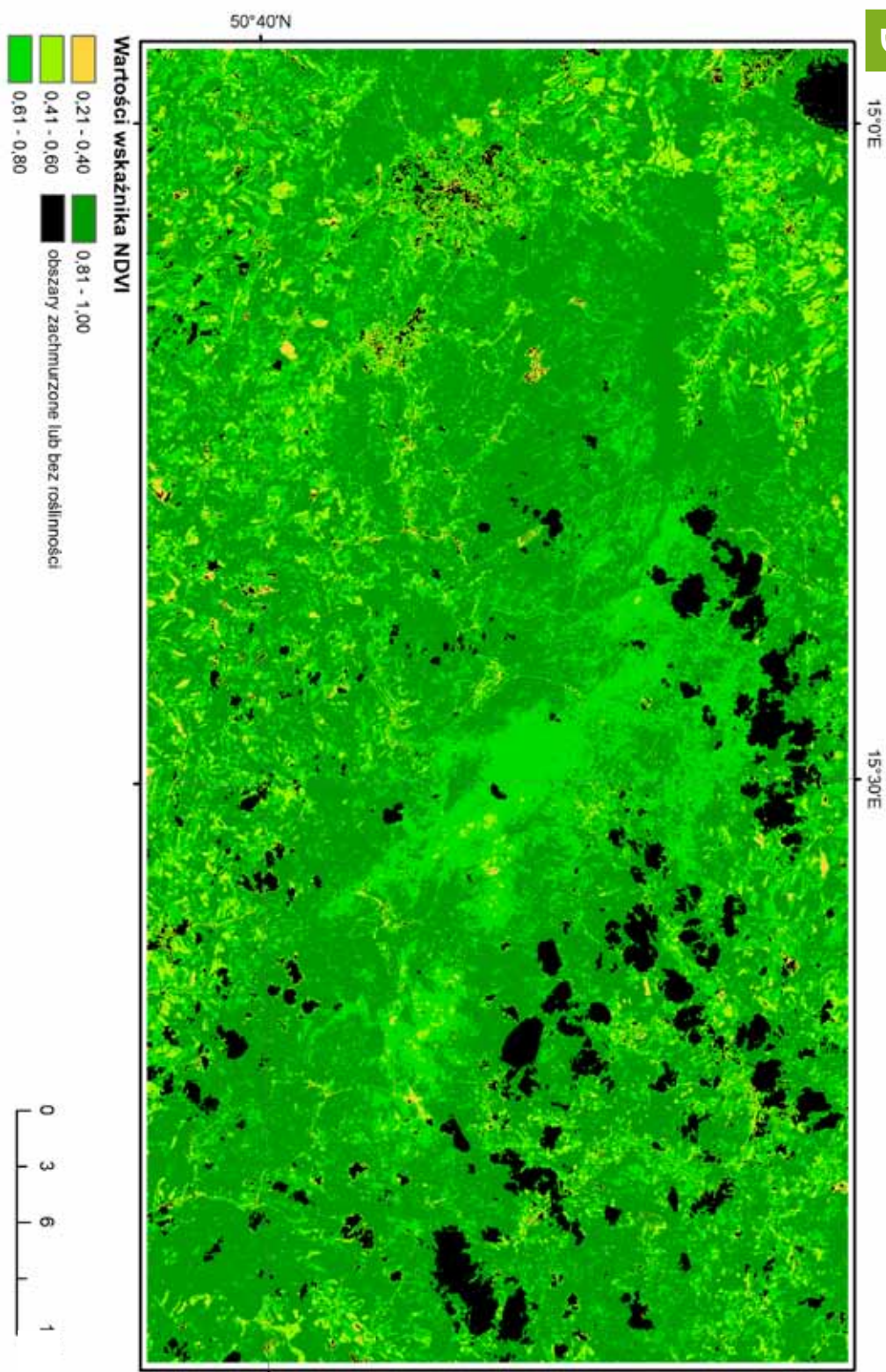
Wartości wskaźnika NDVI

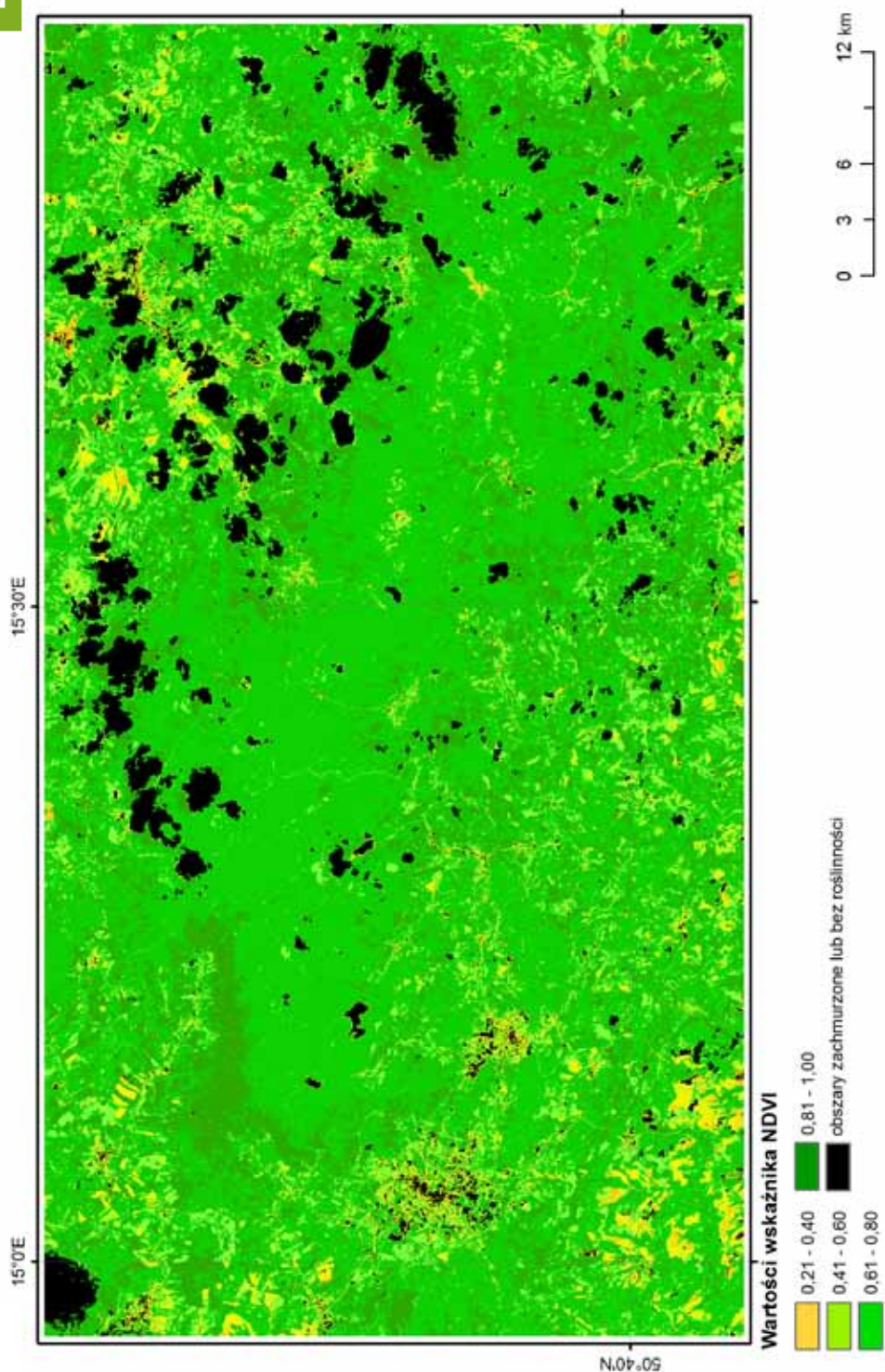


C

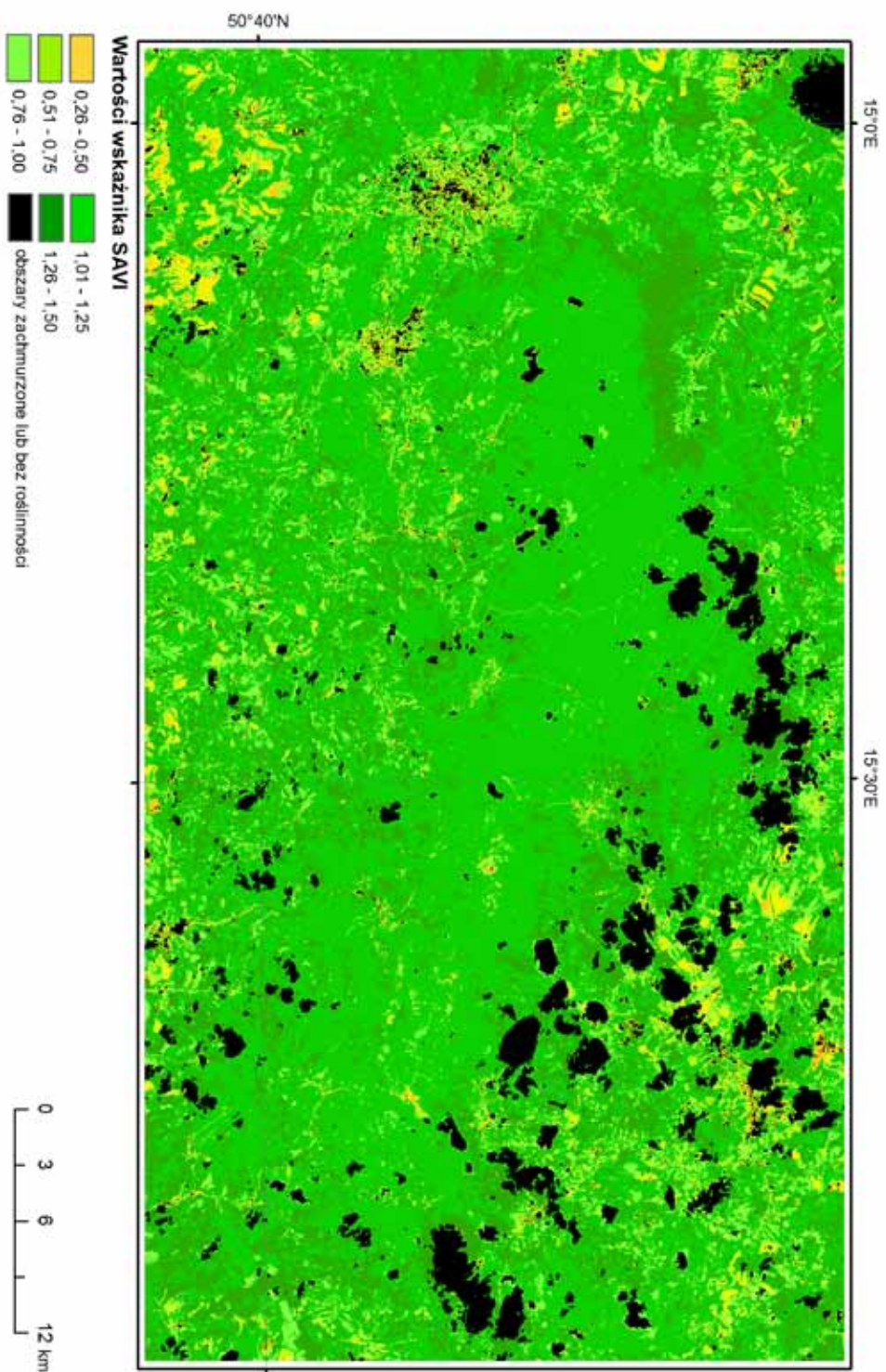


D

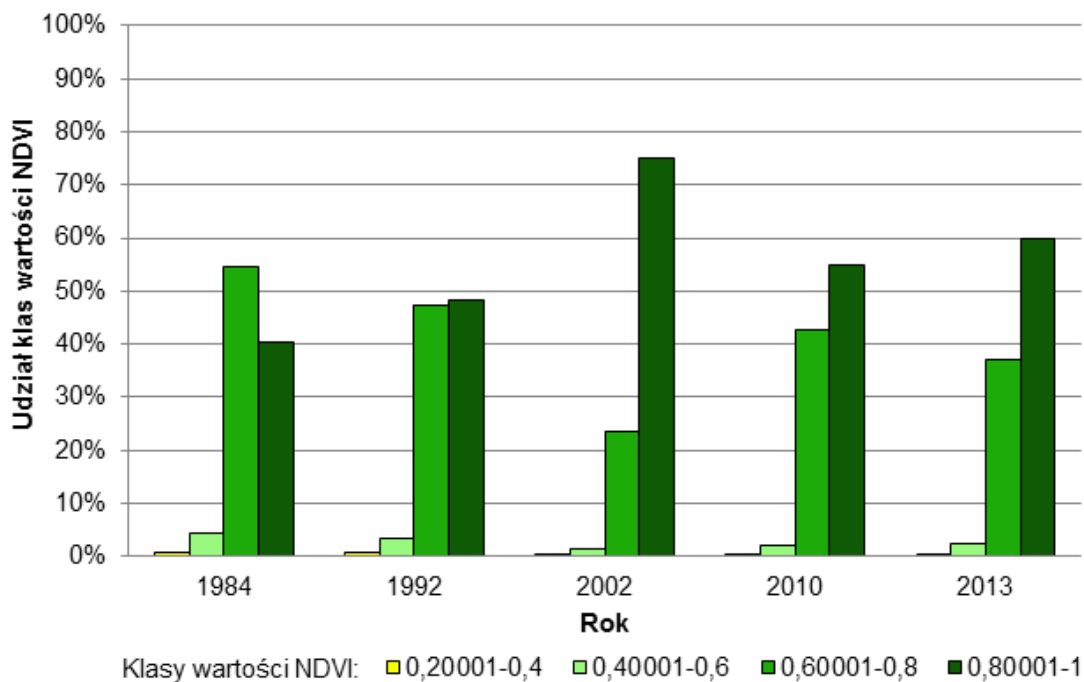




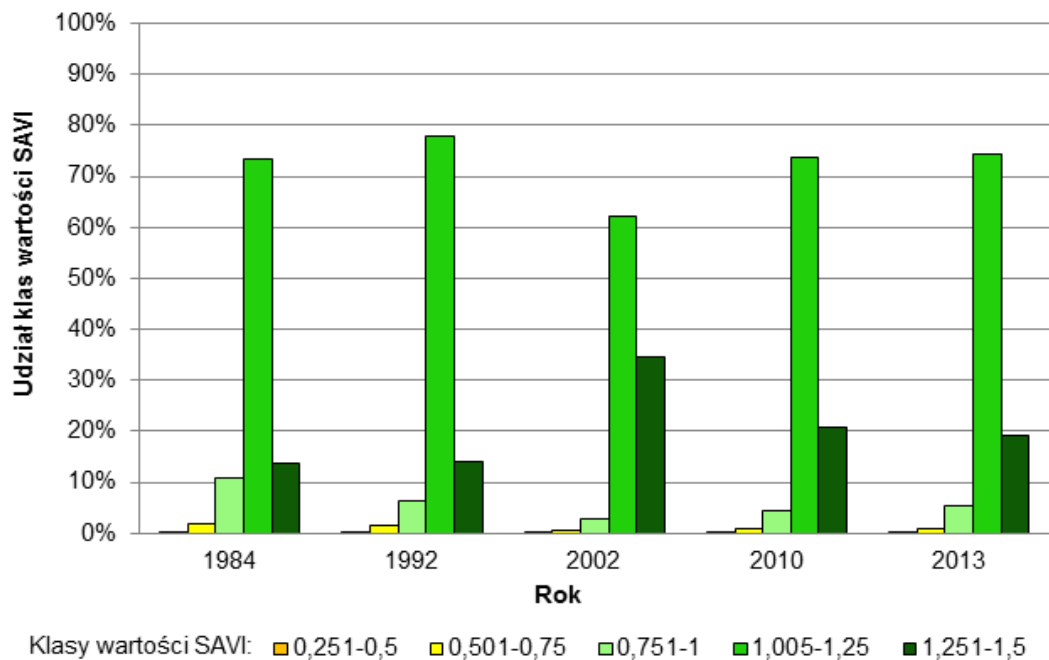
Ryc. 2. Rozkład wartości wskaźnika Normalized Difference Vegetation Index w następujących terminach: (a) 11 lipca 1984, (b) 25 lipca 1992, (c) 21 lipca 2002, (d) 3 lipca 2010 i (e) 27 lipca 2013.



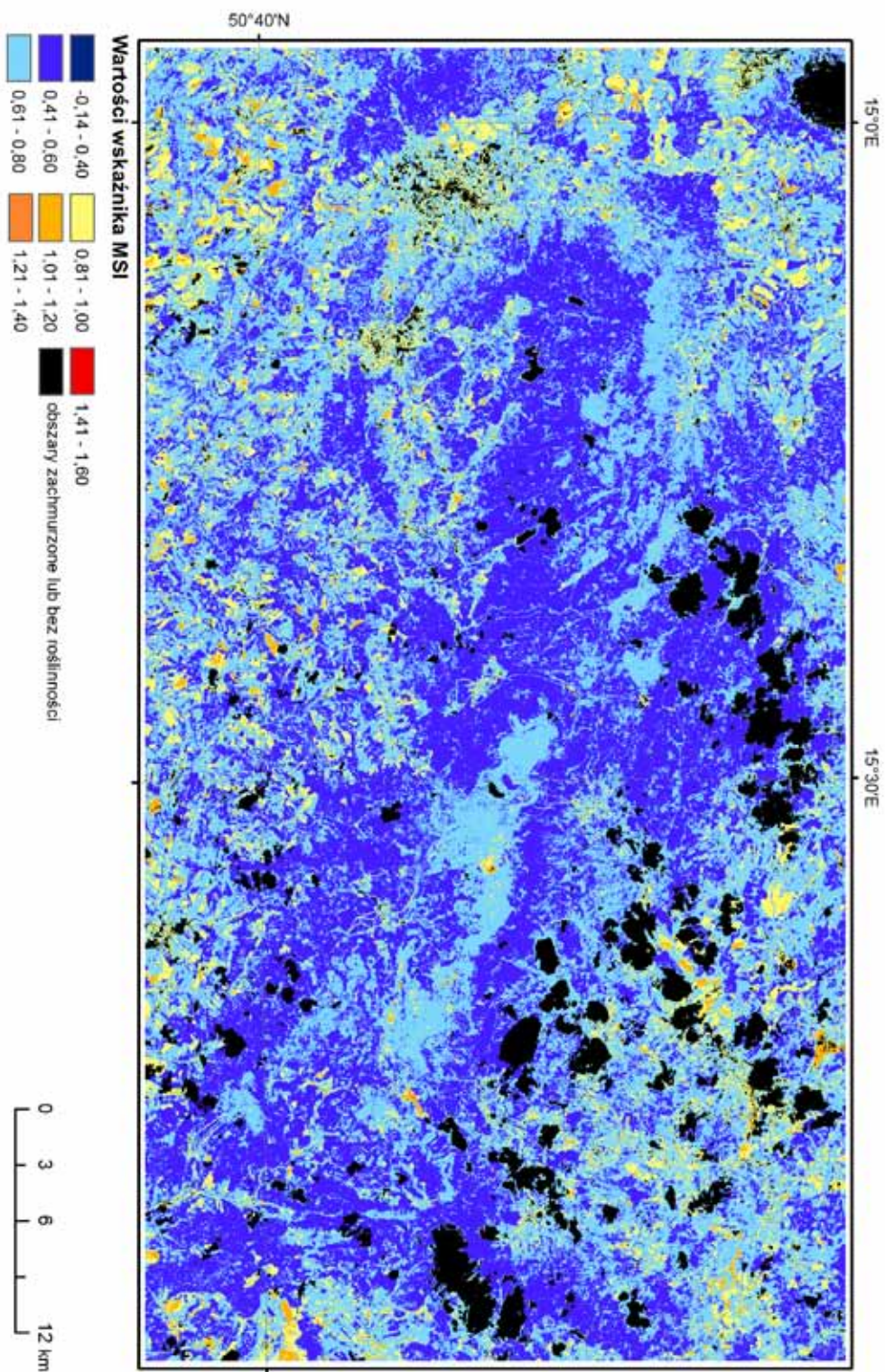
Ryc. 4. Rozkład wartości wskaźnika Soil Adjusted Vegetation Index w roku 2013.



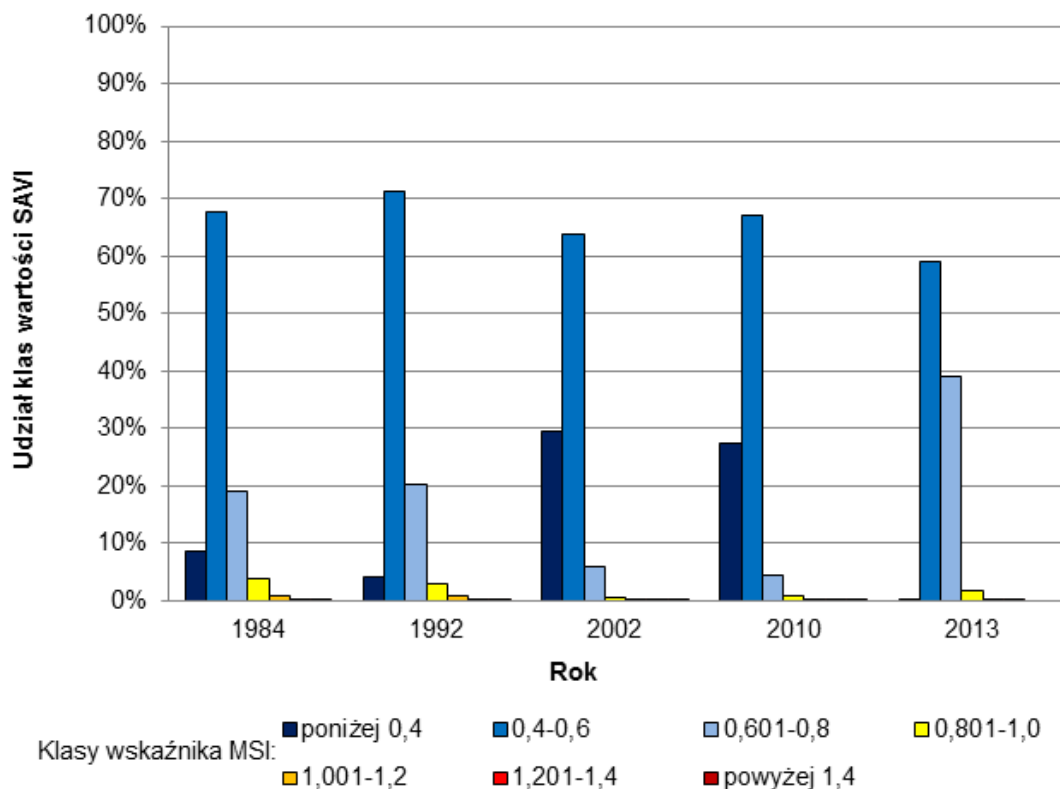
Ryc. 3. Procentowy udział klas kondycji roślinności w badanych okresach na podstawie wskaźnika Normalized Difference Vegetation Index na obszarze polskiej części Karkonoszy i Gór Iżerskich.



Ryc. 5. Procentowy udział klas kondycji roślinności w badanych okresach na podstawie wskaźnika Soil Adjusted Vegetation Index na obszarze polskiej części Karkonoszy i Gór Iżerskich.



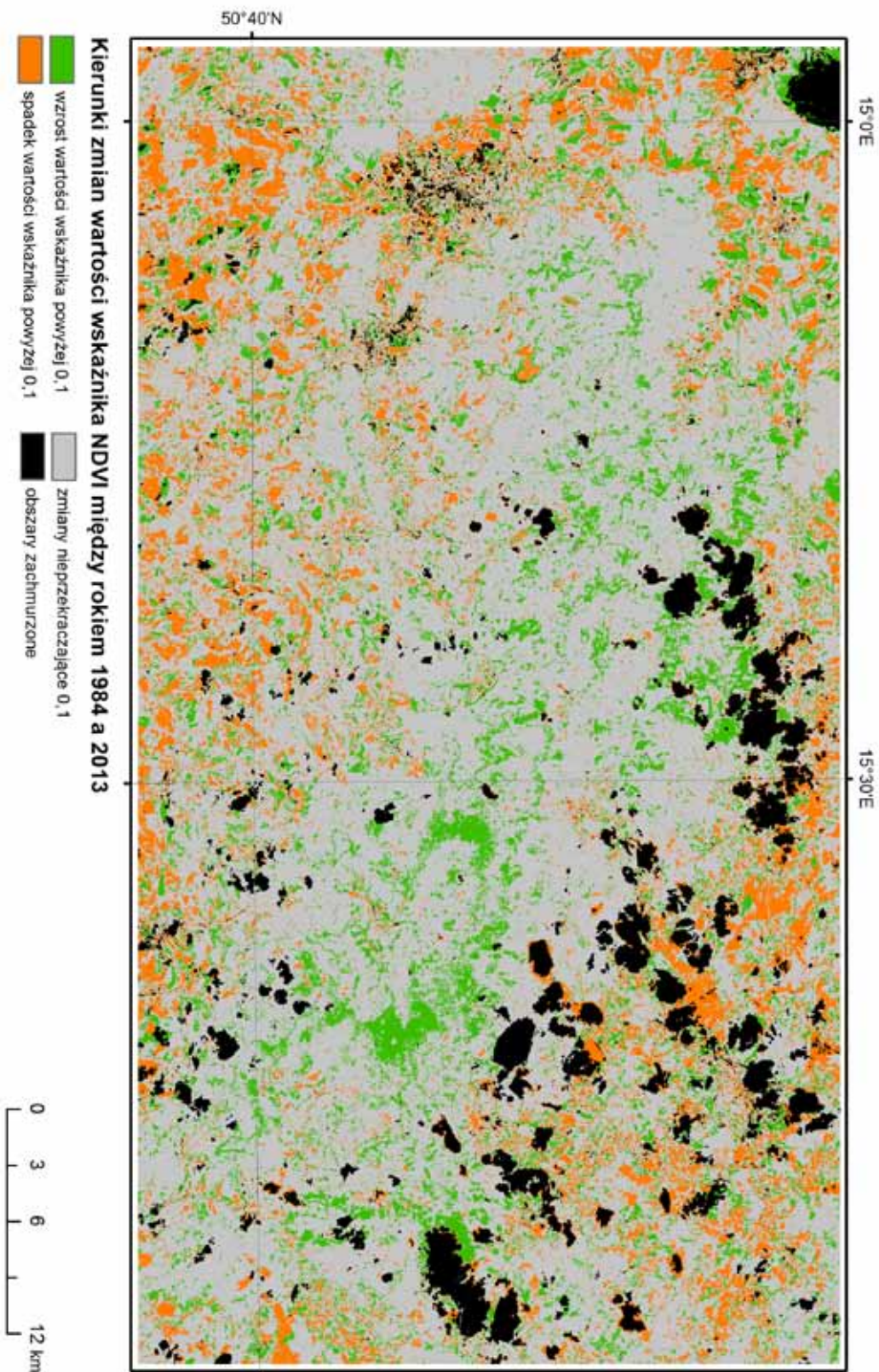
Ryc. 6. Rozkład wartości wskaźnika Moisture Stress Index w roku 2013.



Ryc. 7. Procentowy udział klas kondycji roślinności w badanych okresach na podstawie wskaźnika Moisture Stress Index na obszarze polskiej części Karkonoszy i Gór Izerskich.

procentowy udział klas kondycji roślinności w badanych okresach na podstawie SAVI na obszarze polskiej części Karkonoszy i Gór Izerskich. Przedstawia on poza kondycją roślinności także gęstość pokrywy roślinnej. W tym przypadku najgorszą kondycję zanotowano w roku 1984, ale również w 1992 jest ona zbliżona. Najlepszą kondycję rośliny miały w roku 2002, kiedy 34% badanej roślinności znalazło się w klasie wskaźnika o najwyższych wartościach, oznaczających bardzo dobrą kondycję roślinności. Znowu widoczne jest niewielkie pogorszenie kondycji w roku 2010. Aktualny rozkład SAVI wskazuje na dobrą kondycję roślinności na większości obszaru. Generalnie na podstawie obu wskaźników kondycji roślinności NDVI i SAVI można stwierdzić, że pokrywa roślinna była w dość dobrej kondycji, ale jednocześnie widoczne jest obniżenie wartości wskaźników na początku badanego okresu, co pokrywa się z trwaniem klęski ekologicznej. Kolejnym badanym wskaźnikiem był określający stres wod-

ny roślin *Moisture Stress Index* (Ryc. 6 i 7). W przypadku wskaźnika MSI im niższe wartości wskaźnika, tym większa zawartość wody. Generalnie warunki wilgotnościowe na analizowanym terenie nie były bardzo zróżnicowane, na przeważającej części terenu we wszystkich okresach nie zanotowano stresu wodnego. W roku 1984 zawartość wody była wystarczająca. Nieco mniejsza zawartość wody występowała w roku 1992. Podobnie jak w przypadku wskaźnika NDVI, najlepsze warunki występowały w roku 2002. W tym czasie szczególnie na terenie górskim zawartość wody była wysoka. Aż 29% badanej roślinności w tym roku znajdowało się w klasie wskaźnika o najniższych wartościach. Bardzo zbliżone warunki wilgotnościowe występowały w roku 2010. Mniejsza zawartość wody była notowana w roku 2013, co mogło spowodować niewielkie obniżenie wartości wskaźników określających kondycję. Ostatnim etapem było określenie zmian w wartości wskaźni-



Ryc. 8. Rozkład zmian wartości wskaźnika Normalized Difference Vegetation Index między rokiem 1984 a 2013.

ka NDVI określającego ogólną kondycję roślinności.

Ryc. 8 przedstawia zmiany wskaźnika między dwoma obrazami z roku 1984 i 2013. Na podstawie tej analizy można stwierdzić, że na przeważającej części terenu (około 78%) zmiany w wartościach wskaźnika nie są duże (zmiany nie przekraczają wartości 0,1 lub -0,1, a takie wahania wartości można uznać za brak zmian kondycji). Na około 17% wartości wskaźnika wzrosły o ponad 0,1, co oznacza polepszenie się kondycji roślinności. Najbardziej widoczne było to na zboczach gór porośniętych lasami. Na 5% wartości zmniejszyły się o ponad 0,1, co oznacza, że zmiany w kondycji roślinności nie były bardzo duże, a jednocześnie notowany był raczej wzrost wskaźnika niż spadek.

WNIOSKI

Na podstawie badań można stwierdzić, że kondycja Karkonoszy i Gór Izerskich była dość dobra, nawet w trakcie trwania klęski ekologicznej. Nieco gorszą kondycję roślinności notowano w latach 1984 i 1992. Zdecydowanie najlepsza kondycja była w roku 2002. Polepszenie kondycji roślinności było szczególnie widoczne w obszarze wysokogórskim. Zbliżone rezultaty uzyskano na podstawie wszystkich analizowanych wskaźników. Zastosowana metoda szacowania wilgotności wskazuje na tę samą tendencję. Warunki wilgotnościowe na analizowanym terenie nie były bardzo zróżnicowane, raczej nie notowano stresu wodnego roślin. Najwilgotniejszymi okresami były lata 2002 i 2010. Na podstawie przeprowadzonej analizy zmian stwierdzono, że kondycja roślinności między rokiem 1984 i 2013 była zbliżona na znacznej na

większości terenu lub polepszyła się.

Można stwierdzić, że dane satelitarne są bardzo przydatnym źródłem informacji o stanie roślinności. Szczególnie jest to istotne w przypadku analiz terenów górskich, do których jest ograniczony dostęp oraz obszarów chronionych, gdzie badania powinny być przeprowadzane jak najmniej inwazyjnymi technikami. Jednocześnie tego typu środowiska powinny być jak najczęściej monitorowane.

Techniki teledetekcyjne pozwalają na analizę roślinności w sposób zobjektywizowany. Jednak określają jej stan jedynie w momencie wykonywania zobrazowania. Na kondycję roślinności w jednym momencie wpływa wiele czynników, w tym także pogoda. Obrazy wskazują na chwilowy stan roślinności, co może powodować błędy, jeśli daty wykonania obrazów odbiegały od rocznej normy. Kolejnym etapem badań powinna być szczegółowa analiza kondycji w podziale na zbiorowiska roślinne, w tym szczególnie podział na zbiorowiska leśne i nieleśne.

Na podstawie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że:

- Dane satelitarne umożliwiły określenie stanu roślinności na obszarze Karkonoszy i gór Izerskich.
- Kondycja roślinności na badanym obszarze była dość dobra i zmieniała się w czasie, ale widoczne jest pogorszenie stanu w latach 1984 i 1992.
- Dane satelitarne są bardzo przydatnym źródłem informacji o stanie roślinności, szczególnie w przypadku obszarów chronionych oraz górskich.

LITERATURA

- ARAÚJO L. J., SANTOS J. R. & SHIMABUKURO Y. E. 2000: RELATIONSHIP BETWEEN SAVI AND BIOMASS DATA OF FOREST AND SAVANNA CONTACT ZONE IN THE BRAZILIAN AMAZONIA. INTERNATIONAL ARCHIVES OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. VOL. XXXIII, PART B7. REMOTE SENSING DIVISION: 77-81.
- BONNEAU L. R., SHIELDS K. S. & CIVCO D. L. 1999: USING SATELLITE IMAGES TO CLASSIFY AND ANALYZE THE HEALTH OF HEMLOCK FORESTS INFESTED BY THE HEMLOCK WOOLLY ADELGID. BIOLOGICAL INVASIONS 1: 255–267.
- DANIELEWICZ W., RAJ A. & ZIENTARSKI J. 2013: LASY. W: KNAPIK R. & RAJ A. (RED.), PRZYRODA KARKONOSKIEGO PARKU NARODOWEGO, KARKONOSKI PARK NARODOWY, JELENIA GÓRA: 279-302.
- GLENN E. P., HUETE A. R., NAGLER P. L. & NELSON S. G. 2008: RELATIONSHIP BETWEEN REMOTELY-SENSED VEGETATION INDICES, CANOPY ATTRIBUTES AND PLANT PHYSIOLOGICAL PROCESSES: WHAT VEGETATION INDICES CAN AND CANNOT TELL US ABOUT THE LANDSCAPE. SENSORS. VOL. 8: 2136–2160.
- HALL R. J., DAVIDSON D. P. & PEDDLE D. R. 2003: GROUND AND REMOTE ESTIMATION OF LEAF AREA INDEX IN ROCKY MOUNTAIN FOREST STANDS, KANANASKIS, ALBERTA. CAN. J. REMOTE SENSING, VOL. 29, NO. 3: 411–427.
- HUETE A. R. 1988: A SOIL-ADJUSTED VEGETATION INDEX (SAVI). REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT. VOL. 25: 295–309.
- HUNT E. R., ROCK B. N. & NOBEL P. S. 1987: MEASUREMENT OF LEAF RELATIVE WATER CONTENT BY INFRARED REFLECTANCE. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOL. 22: 429–435.
- HUNT JR E. R., LI L., YILMAZ M. T. & JACKSON T. J. 2011: COMPARISON OF VEGETATION WATER CONTENTS DERIVED FROM SHORT WAVEINFRARED AND PASSIVE-MICROWAVE SENSORS OVER CENTRAL IOWA. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOL. 115: 2376–2383.
- HUNT E. R. & ROCK B. N. 1989: DETECTION OF CHANGES IN LEAF WATER CONTENT USING NEAR- AND MIDDLE-INFRARED REFLECTANCES. REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, VOL. 30: 43–54.
- JAROCIŃSKA A. & ZAGAJEWSKI B. 2009: REMOTE SENSING TOOLS FOR ANALYSING STATE AND CONDITION OF VEGETATION. ANNALS OF GEOMATICS TOM 7 NR 2 (32): 47-54.
- JAROCIŃSKA A. 2011: THE COMPARISON OF THE SPECTRUM MODELLING OF DIFFERENT KINDS OF MEADOWS. PROCEEDINGS OF 31ST EARS&L SYMOSIUM, PRAGUE, 30 MAY – 2 JUNE 2011, REMOTE SENSING AND GEOINFORMATION NOT ONLY FOR SCIENTIFIC COOPERATION, 144–151.
- JAROCIŃSKA A. 2012: OCENA SKUTECZNOŚCI MODELU TRANSFERU PROMIENIOWANIA W BADANIACH STANU ROŚLINNOŚCI ŁĄK. TELEDETEKCJA ŚRODOWISKA, VOL. 48.
- JAROCIŃSKA A. 2014: RADIATIVE TRANSFER MODEL PARAMETRIZATION FOR SIMULATING THE REFLECTANCE OF MEADOW VEGETATION. MISCELLANEA GEOGRAPHICA — REGIONAL STUDIES ON DEVELOPMENT, VOL. 18 (2): 5-9.
- MARCINKOWSKA A., ZAGAJEWSKI B., OCHTYRA A., JAROCIŃSKA A., RACZKO E., KUPKOVÁ L., STYCH P. & MEULEMAN K., 2014: MAPPING VEGETATION COMMUNITIES OF THE KARKONOSZE NATIONAL PARK USING APEX HYPERSPECTRAL DATA AND SUPPORT VECTOR MACHINES. MISCELLANEA GEOGRAPHICA — REGIONAL STUDIES ON DEVELOPMENT, VOL. 18 (2): 23-29.
- RAJ A. 1992: OBUMIERANIE LASÓW W KARKONOSKIM PARKU NARODOWYM, PARKI NARODOWE. 3: 5-6
- RAJ A. & ZIENTARSKI J. 2004: CHARAKTERYSTYKA DRZEWOSTANÓW I ODNOWIEŃ W KARKONOSKIM PARKU NARODOWYM, GEOEKOLOGICZNE PROBLEMY KARKONOSZY, OPERA CONCORDICA, TOM 2: 249-366
- ROCK B. N., VOGELMANN D. L., WILLIAMS A. E. & HOSHIZAKI T. 1986: REMOTE DETECTION OF FOREST DAMAGE. BIOSCIENCE 36: 439–445.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A. & DEERING D.W. 1973: MONITORING VEGETATION SYSTEMS IN THE GREAT PLAINS WITH ERTS. THIRD ERTS SYMPOSIUM, NASA SP-351 I: 309-317.
- TELESA L. & LASAPONARA R. 2006: ESTIMATION OF FIRE-INDUCED VARIABILITY IN VEGETATION COVERS BY USING DETRENDED FLUCTUATION ANALYSIS. PHYSICA A368: 531–535.
- WALCZYKOWSKI P., ORYCH A. & ŁYSENKO J. 2012: PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA ZOBRAZOWAŃ LANDSAT TM DO OCENY STANU ZAGROŻENIA POŻAROWEGO LASÓW. ARCHIWUM FOTOGRAMETRII, KARTOGRAFII I TELEDETEKCJI VOL. 24: 393-402.
- ZAGAJEWSKI B. 2010: OCENA PRZYDATNOŚCI SIECI NEURONOWYCH I DANYCH HIPERSPEKTRALNYCH DO KLASYFIKACJI ROŚLINNOŚCI TATR WYSOKICH. TELEDETEKCJA ŚRODOWISKA, VOL. 43.
- ZARZECKI M., PASIERBIŃSKI A. 2009: APPLICATIONS OF GIS AND REMOTE SENSING IN VEGETATION RESEARCH. WIADOMOŚCI BOTANICZNE 53 (3/4): 53–66.
- ZAWILA-NIEDŹWIECKI T. & WIŚNIEWSKA E. 2004: SATELLITE BASED INVENTORY OF INSECTS OUTBREAKS AS A TOOL OF FOREST LANDSCAPE MONITORING. PROCEEDINGS OF THE LVIV UNIVERSITY, SER. GEOGR. 31: 285–291.