

Badanie dynamiki odnawiania się siedlisk przyrodniczych w Biebrzańskim Parku Narodowym po pożarze z 2020 r.

*Study of the dynamics of regeneration of natural
habitats in the Biebrza National Park after the
fire in 2020*

Joanna CERANKA

Warsaw University of Technology
Faculty of Geodesy and Cartography
joanna.ceranka.stud@pw.edu.pl

Aleksandra RADECKA

Warsaw University of Technology
Faculty of Geodesy and Cartography
aleksandra.radecka@pw.edu.pl

Katarzyna OSIŃSKA-SKOTAK

Warsaw University of Technology
Faculty of Geodesy and Cartography
katarzyna.osinska-skotak@pw.edu.pl

Abstract: The fire that occurred in the central part of Biebrza National Park (BbPN) in 2020 was one of the largest large-area wildfires in Poland. A total of 5,526 ha burned, i.e., approximately 9.5% of the Park's area, including 4,580 ha within the boundaries of BbPN and 946 ha within its buffer zone. The fire destroyed about 96 ha of Natura 2000 natural habitats from EU Habitats Directive Annex I. The aim of the study was to determine the regeneration dynamics of individual Natura 2000 habitat types after the fire, as well as to assess the suitability of PlanetScope imagery for this purpose. The analysis was based on 13 satellite images (PS Ortho Tile Analytic SR and PS Ortho Scene 4-band Analytic SR products) acquired between 28 April and 17 August 2020, and one image from 9 May 2019. The assessment of habitat regeneration was divided into two stages: (1) a comparative analysis of NDVI values for individual habitats within the burned and unburned areas, and (2) an analysis of dNDVI index images for selected pairs of dates: 9 May 2019 and 8 May 2020 (i.e., before the fire and shortly after it), and 8 May and 18 July 2020 (to analyse the degree of vegetation recovery). The comparative analysis of NDVI values for individual habitats in the burned and unburned areas showed that the most vigorous regeneration occurred in molinia meadows on calcareous, peaty or clayey-silt-laden soils (*Molinion caeruleae*) (6410). The second-fastest regeneration was observed in alluvial meadows of river valleys of the *Cnidion dubii* (6440) and reed beds. Habitats with the slowest recovery rates were xeric sand calcareous grasslands (6120) and natural eutrophic lakes with *Magnopotamion* or *Hydrocharition* (3150). PlanetScope satellite imagery, due to its high spatial and temporal resolution, proved to be a very good data source for analysing the dynamics of post-fire habitat regeneration.

Streszczenie: Pożar, który wystąpił w środkowej części Biebrzańskiego Parku Narodowego (BbPN) w 2020 roku był jednym z największych pożarów wielkopowierzchniowych w Polsce. Wypaleniu uległo 5 526 ha, czyli ok. 9,5% powierzchni Parku, w tym 4 580 ha w granicach BbPN oraz 946 ha otuliny. Pożar strawił ok. 96 ha siedlisk przyrodniczych Natura 2000 wymienionych w Załączniku I Dyrektywy Siedliskowej. Celem przeprowadzonych badań było określenie dynamiki odradzania się poszczególnych typów siedlisk przyrodniczych Natura 2000 po pożarze, jak również ocena przydatności zobrazowań PlanetScope do tego celu. Do badań wykorzystano 13 obrazów satelitarnych (produkty PS Ortho Tile Analytic SR i PS Ortho Scene 4-band Analytic SR) z okresu od 28 kwietnia do 17 sierpnia 2020 r. oraz jedno zobrazowanie z 9 maja 2019 r. Analizę odnawiania się siedlisk przyrodniczych podzielono na dwa etapy: 1) analizę porównawczą wartości NDVI poszczególnych siedlisk na obszarach dotkniętych pożarem oraz poza nim, oraz 2) analizę obrazów wskaźnikowych dNDVI dla wybranych par terminów: 9 maja 2019 r. i 8 maja 2020 r. (czyli przed pożarem i niedługo po pożarze), oraz 8 maja i 18 lipca 2020 r. (analiza stopnia regeneracji roślinności). W wyniku przeprowadzonych analiz porównawczych wartości NDVI w poszczególnych siedliskach przyrodniczych na obszarze spalonym i niespalonym stwierdzono, że najbujniej odrodziły się zmiennowilgotne łąki trzęślicowe (6410). Drugie, pod względem do tempa regeneracji roślinności były łąki selernicowe (6440) oraz szuwały. Siedliska, które cechowały się najpowolniejszym tempem odradzania były ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe (6120) oraz starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (3150). Zobrazowanie satelitarne PlanetScope, dzięki wysokiej rozdzielczości przestrzennej, jak również czasowej, okazały się bardzo dobrym źródłem danych do analizy dynamiki odnawiania się siedlisk przyrodniczych po pożarze.

Słowa kluczowe: Natura 2000, mokradła, wskaźniki roślinności, NDVI

Wprowadzenie

Pożar, który wystąpił w środkowej części Biebrzańskiego Parku Narodowego (BbPN) w 2020 roku był jednym z największych pożarów wielkopowierzchniowych w Polsce od dekad oraz ogromną tragedią dla unikatowego bogactwa przyrodniczego Polski. Ogień został zauważony w Niedzielę Wielkanocną 19 kwietnia 2020 r. na terenie Basenu Środkowego BbPN. Działania gaśnicze zostały zakończone tydzień później, 26 kwietnia. Wypaleniu uległo 5 526 ha, czyli ok. 9,5% powierzchni Parku – w tym 4 580 ha w granicach BbPN oraz 946 ha otuliny (Wiatr, 2021). 1 127 ha obszaru pożarzyska stanowiły ekosystemy leśne (Wiatr, 2021), zaś 4 399 ha – ekosystemy nieleśne. Za przyczynę pożaru uznano nielegalne wypalanie traw i nieumyślne zaproszenie się ognia.

W pożarze ucierpiały siedliska z Załącznika I i II Dyrektywy Siedliskowej (96 ha, z czego 13 ha w samym Parku) oraz liczne inne zbiorowiska roślinne. Ogień objął swoim zasięgiem miejsca występowania żurawia, uszatki błotnej, ptaków siewowych czy orlika grubodziobego, jak również cennego cietrzewia, którego Park jest jedną z najważniejszych ostoi w Polsce. Pożar miał charakter powierzchniowy, co oznacza, że ogniem nie zajęły się pokłady zalegającego torfu, którego ugaszenie mogłoby trwać miesiącami i którego skutki byłyby dużo bardziej poważne.

Pożar lasów, jak również innych zbiorowisk przyrodniczych, w zależności od intensywności ognia, czasu jego oddziaływania, prędkości i kierunków rozprzestrzeniania się, wpływa zarówno na całość ekosystemu, jak i na poszczególne jego elementy. Jego bezpośrednim skutkiem jest częściowe lub całkowite zniszczenie roślin lub ich osłabienie, natomiast zjawiskiem wtórnym są zmiany abiotyczne elementów ekosystemu (mikroklimat, gleba) (Szczygieł, 2010). Pożary powierzchniowe zbiorowisk przyrodniczych powodują zaburzenie tempa obiegu materii w ekosystemie, jak również w większości przypadków zmniejszenie różnorodności biologicznej obszarów objętych klęską. W przypadku roślinności łąkowej czy trzcinowisk ich odrodzenie się następuje zwykle w ciągu roku, jednak w przypadku lasów trwa to znacznie dłużej – nawet kilkadziesiąt lat w zależności od stopnia zniszczenia siedlisk leśnych. Jeśli pożar obejmie również glebę, to wówczas proces odnowienia siedlisk jest długotrwały – może potrwać kilka - kilkanaście lat, zanim pojawią się pierwsze rośliny, a pełna regeneracja gleb może potrwać nawet dziesięciolecia. Mikrobiologiczna regeneracja gleb rozpoczyna się stosunkowo szybko, ale postępuje wolno (Szczygieł, 2010).

Stopień degradacji, jak i regeneracji siedlisk przyrodniczych można określić metodami terenowymi, jak również metodami teledetekcyjnymi, przy czym metody terenowe są czasochłonne i w przypadku dużych obszarów nie ma możliwości objęcia szczegółowymi badaniami całości terenu. Współcześnie w monitorowaniu siedlisk coraz częściej oba te podejścia są łączone, dzięki czemu wykorzystuje się ich zalety, jednocześnie minimalizując ograniczenia każdego z nich. Jedną z metod analizy i oceny procesów odnowy siedlisk przyrodniczych po zaburzeniach naturalnych lub antropogenicznych są teledetekcyjne wskaźniki spektralne, wśród których znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności (NDVI) (ang. Normalized Difference Vegetation Index) jest jednym z najczęściej stosowanych w zastosowaniach z obszaru ekologii (Pettorelli i in., 2011, 2014). Wskaźnik ten po raz pierwszy zdefiniowano w publikacji Rouse i in. (1973), a do jego obliczenia wykorzystywane są wartości odbicia spektralnego rejestrowane w zakresie promieniowania czerwonego (R) oraz w bliskiej podczerwieni (NIR):

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}, \quad (1)$$

Jego wykorzystanie umożliwia między innymi na śledzenie dynamiki zmian biomasy i pokrywy roślinnej w czasie. Analizując zmiany wartości NDVI można śledzić postęp w odradzaniu się roślinności, identyfikować obszary, w których odnawia się ona szybciej, a w których wolniej. W powiązaniu z dodatkowymi informacjami dot. typu siedliska czy rodzaju podłoża glebowego możliwe jest także wskazanie jakie typy siedlisk szybciej się regenerują po różnego rodzaju klęskach żywiołowych, a w przypadku których następuje to znacznie wolniej. Integracja wskaźników teledetekcyjnych z danymi terenowymi zwiększa dokładność oceny stanu odnowy ekosystemów (Pasetto i in., 2018). Obserwacje terenowe uzupełniają dane na temat struktury siedlisk i wskazują na ewentualne jej przebudowanie. W przypadku oceny stopnia degradacji siedlisk wskutek pożaru najczęściej stosuje się wskaźnik NBR (ang. Normalized Burn Ratio) (Escuin i in., 2008), który po raz pierwszy użyli Key i in. (2002). Oblicza się go na podstawie wartości odbicia spektralnego zarejestrowanego w zakresach bliskiej podczerwieni (NIR) i podczerwieni krótkiej (SWIR):

$$NBR = \frac{NIR-SWIR}{NIR+SWIR}, \quad (2)$$

W wyniku przeprowadzonych badań Key i in. (2002) stwierdzili, że NBR jest najbardziej efektywnym wskaźnikiem do określania stopnia uszkodzenia niezależnie od okresu fenologicznego. W przypadku NDVI okazało się, że wpływ fenologii na rozróżnienie intensywności uszkodzeń roślinności na skutek pożaru jest większy niż dla NBR. W szczególności w późniejszej fazie rozwoju roślinności możliwość sklasyfikowania poszczególnych stopni intensywności uszkodzeń jest utrudniona, co wynika z mniejszej amplitudy zmienności wartości NDVI. Jednak większość wysokorozdzielczych systemów satelitarnych nie rejestruje obrazowań w zakresie krótkiej podczerwieni i w ich przypadku do oceny stopnia intensywności uszkodzeń roślinności po pożarze stosuje się wskaźnik dNDVI, definiowany jako różnica wartości NDVI obliczonego na podstawie danych pozyskanych przed pożarem ($NDVI_{pre-fire}$) oraz niedługo po pożarze ($NDVI_{p-fire}$):

$$dNDVI = NDVI_{pre-fire} - NDVI_{p-fire}, \quad (3)$$

Obecnie mamy szeroki dostęp do wielu różnorodnych danych teledetekcyjnych. Są to udostępniane nieodpłatnie dane satelitarne z programów Europejskiej Agencji Kosmicznej (seria satelitów Sentinel) i amerykańskiej agencji naukowo-badawczej United States Geological Survey – USGS (program Landsat), które zapewniają dużą częstotliwość obserwacji (co 3-7 dni), dzięki czemu możliwe jest realizowanie analiz trendów sezonowych i porównań rok do roku. Cechują się one rozdzielczością przestrzenną na poziomie 10-30 m, co dla niektórych zastosowań jest niewystarczające, w szczególności gdy płyty siedlisk przyrodniczych są niewielkie. Jednak ich zaletą jest rejestracja kilkunastu zakresów promieniowania (13 w przypadku Sentinel-2, 11. dla Landsat 8/9), co wpływa na możliwość prowadzenia szczegółowych analiz spektralnych i obliczenia wielu różnych wskaźników spektralnych. Wyższą rozdzielczość przestrzenną zapewniają dane z satelitów komercyjnych (m.in. WorldView-4, GeoEye-1, Cartosat-3), które rejestrują obrazowania z GSD (ang. Ground Sample Distance) od 0,25 m (Cartosat-3) do ok. 4 m w zależności od trybu rejestracji obrazów (panchromatyczny/wielospektralny). Tego typu dane pozwalają na uszczegółowienie analiz pod względem przestrzennym (w tym analizę mniejszych płatów siedlisk przyrodniczych), jednak zwykle obejmują jedynie 4-5 zakresów spektralnych (niebieski, zielony, czerwony, bliską podczerwień i ew. zakres krawędziowy czerwień/podczerwień). Ta mniejsza liczba rejestrowanych kanałów spektralnych, jak również węższy zakres rejestrowanego promieniowania, powodują, że nie ma możliwości uzyskania na ich podstawie niektórych wskaźników spektralnych, np. brak krótkiej podczerwieni uniemożliwia obliczenie wskaźnika teledetekcyjnego NBR.

Stosunkowo dużą rozdzielczością przestrzenną i spektralną cechują się obrazowania PlanetScope (PlanetLabs, 2020), w których przypadku GSD wynosi ok. 3 m), a obrazowania są rejestrowane w ośmiu zakresach spektralnych (Coastal Blue: 431 – 452 nm, Blue: 465 – 515 nm, Green I: 513 – 549 nm, Green: 547 – 583 nm, Yellow: 600 – 620 nm, Red: 650 – 680 nm, RedEdge: 697 – 713 nm, NIR: 845 – 885 nm). Dodatkową zaletą tej konstelacji jest bardzo duża rozdzielczość czasowa – dane są rejestrowane praktycznie codziennie i jedynie zachmurzenie jest tu czynnikiem ograniczającym uzyskanie serii danych wieloczasowych do analiz zdarzeń szybkozmiennych, co w szerokościach geograficznych Polski jest częste. Ze względu na dużą rozdzielczość przestrzenną i czasową to dane z tej konstelacji zostały wykorzystane do przeprowadzenia analizy procesu odnawiania się siedlisk przyrodniczych w Biebrzańskim Parku Narodowym po pożarze z 2020 r.

Główne cele przeprowadzonych badań obejmowały: 1) określenie dynamiki odradzania się poszczególnych typów siedlisk przyrodniczych Natura 2000 po pożarze w Biebrzańskim Parku Narodowym, 2) ocena czy obrazowania PlanetScope mają wystarczającą rozdzielczość przestrzenną do analizy odnawiania się różnych typów siedlisk przyrodniczych.

Obszar badań

Biebrzański Park Narodowy położony jest w północno-wschodniej Polsce (Ryc. 1), w województwie podlaskim na terenie czternastu gmin w pięciu powiatach, a siedziba dyrekcji BbPN znajduje się w miejscowości Osowiec-Twierdza. Park został powołany na podstawie Rozporządzenia Rady Ministrów z dnia 9 września 1993 roku. Powierzchnia Parku wynosi 592,23 km², zaś jego otulina obejmuje dodatkowe 668,24 km², co czyni go największym parkiem narodowym w Polsce. Celem powołania BbPN była ochrona kompleksu rozległych bagien i torfowisk, będących najlepiej zachowanymi w stanie naturalnym tego typu obszarami w Europie Środkowej oraz środowiskiem bogatym w rzadkie gatunki ptaków, roślin i zbiorowisk leśnych. Jednym z licznie występujących gatunków zwierząt, z których słynie Biebrzański Park Narodowy, jest batalion – wędrowny, różnobarwny ptak, będący symbolem widocznym w logo parku.

Biebrzański Park Narodowy

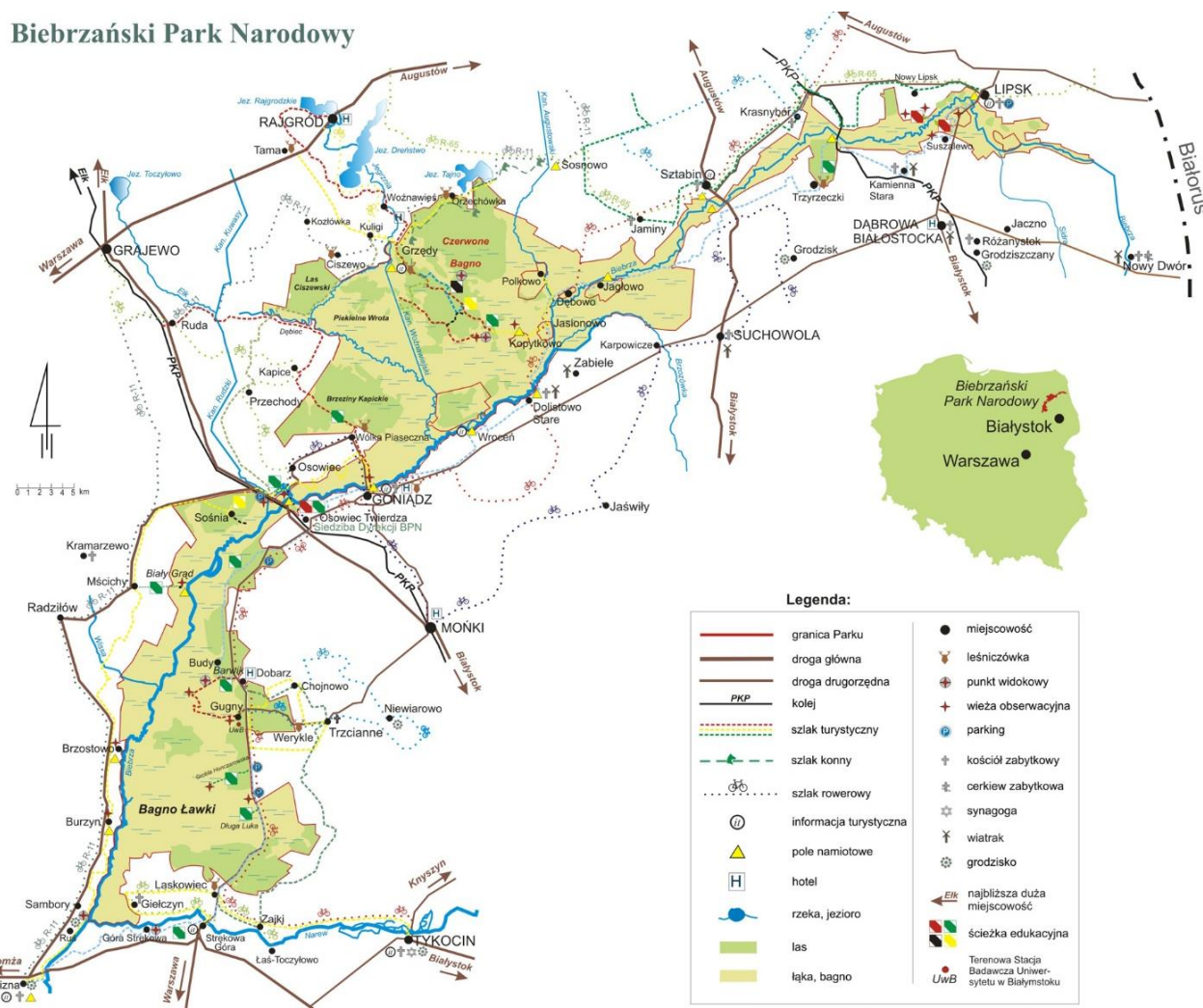


Fig. 1. Map of the Biebrza National Park (source: BbPN, 2023, www.biebrza.org.pl).

Ryc. 1. Mapa Biebrzańskiego Parku Narodowego (źródło: BbPN, 2023, www.biebrza.org.pl).

Największy udział w powierzchni BbPN zajmują nieużytki ekologiczne (bagna) – ok. 42%. Około 31% stanowią grunty rolne, a 26% – lasy. Ochroną ścisłą objęte jest jedynie ok. 12% powierzchni parku, a ochroną krajobrazową 45% (Kalbarczyk, 2016). Granice BbPN obejmują osiem enklaw – wysp mineralnych, przeznaczonych pod uprawy, łąki i osadnictwo siedmiu wsi. Znaczną część parku stanowi Kotlina Biebrzańska – obniżenie terenu wzdłuż rzeki Biebrzy o długości ponad 100 km – od miejsca ujścia rzeki Niedźwiedzicy do Biebrzy, po ujście Biebrzy do Narwi. Dolina Biebrzy podzielona jest dwoma przewężeniami w okolicach Osowca i Sztubina na trzy części (Ryc. 1) (Kalbarczyk, 2016; BbPN, 2023):

- Basen Północny (Górny) – stanowiący wąski pas szerokości 1-3 km, rozciągający się przez 40 km wzdłuż koryta Biebrzy. Miąższość złóż torfów wynosi tu 3-6 m. Miejscami torf położony jest na gytii, czyli osadach powstałych na dnie jezior. Występują tu także ostańce morenowe.
- Basen Środkowy – kształtem zbliżony do trapezu o wymiarach 20 × 40 km, rozciągający się od Sztubina do Osowca. Torfowiska stanowią ok. 45 tys. ha i osiągają miąższość 1-3 m. Północna część torfowisk basenu

podścielona jest piaskiem i żwirem, zaś południowa – osadami wodnymi i gliną. Obszar charakteryzują rozległe wydmy piaszczyste, będące utworami eolicznymi oraz obniżony poziom wód gruntowych, spowodowany zmianą układu hydrograficznego przez wybudowane w XIX w. Kanały Augustowski, Woźnawiejski i Rudzki.

- Basen Południowy (Dolny) – uznawany za najbardziej naturalny fragment doliny Biebrzy. Ma on kształt rynny o szerokości 12-15 m i długości 30 km, ciągnącej się od Osowca do ujścia Biebrzy do Narwi. Na utworach żwirowo-piaskowych, miejscowo pokrytych iłami i osadami wodnymi rozpościera się 21 tys. ha torfowisk o miąższości 1-2 m. Miejscowo występują tu również wydmy.

Na terenie Biebrzańskiego Parku Narodowego (Obszar Natura 2000 Dolina Biebrzy) występuje 48 przedmiotów ochrony: 18 typów siedlisk przyrodniczych, zapisanych w Załączniku I Dyrektywy Siedliskowej jako szczególne dla Europy, 6 gatunków roślin oraz 25 obejmujących ochronę gatunków zwierząt. Pożar, który miał miejsce w 2020 r. objął znaczną część Basenu Środkowego (Ryc. 2) i zagrażał cennym lasom z kompleksu Czerwonego Bagna, Grząd i Brzezin Kapickich, które to tereny udało się przed pożarem obronić olbrzymim wysiłkiem i nakładem środków (Wiatr, 2021).

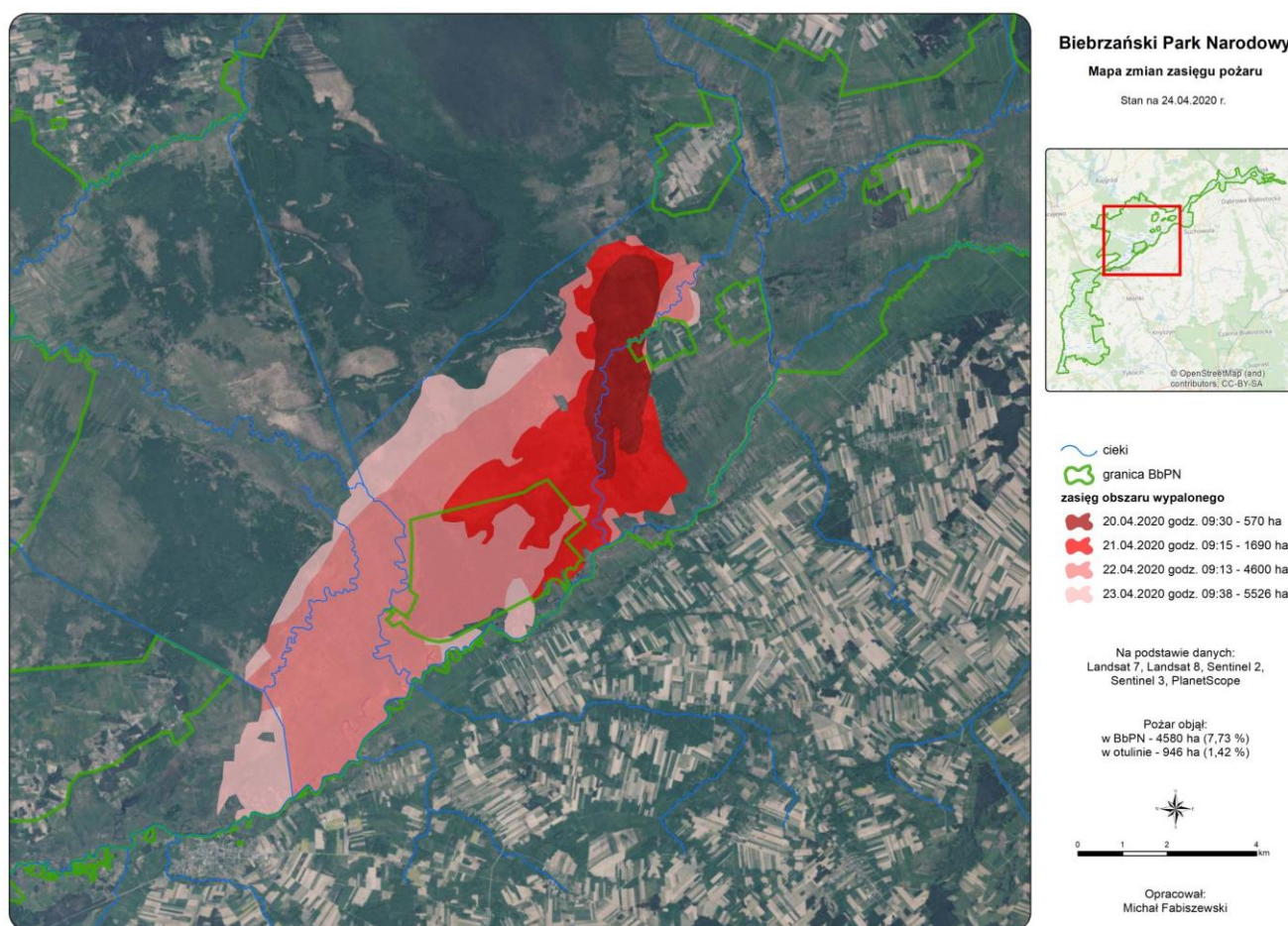


Fig. 2. Changes in the extent of the fire in the Biebrza National Park in April 2020 (source: Wiatr, 2021).

Ryc. 2. Zmiany zasięgu pożaru w Biebrzańskim Parku Narodowym mającego miejsce w kwietniu 2020 r. (źródło: Wiatr, 2021).

Na obszarze tego Basenu BbPN występują następujące siedliska przyrodnicze z Załącznika I Dyrektywy Siedliskowej (GDOŚ, 2024; Wiatr, 2021):

- 2330 – wydmy śródlądowe z murawami napiaskowymi (33,57 ha),
- 3150 – starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (254,73 ha),
- 6120 – ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe (97,99 ha),
- 6410 – zmiennowilgotne łąki trzęślicowe (704,75 ha),
- 6440 – łąki selernicowe (73,48 ha),
- 7230 – górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (4135,83 ha),
- 9170 – grąd środkowoeuropejski i subkontynentalny (749,93 ha).

Praktycznie wszystkie wyżej wymienione typy siedlisk Natura 2000 (z wyjątkiem siedliska 2330) zostały

dotknięte pożarem w roku 2020. Z przeprowadzonej analizy wynika, że największą powierzchnię (51,19 ha) pożar strawił w przypadku siedliska zmiennowilgotne łąki trzęślicowe (6410). W przypadku siedliska starorzeczna i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (3150) pożar objął powierzchnię 16,68 ha; łąk selernicowych (6440) – 7,82 ha; ciepłolubnych, śródlądowych muraw napiaskowych (6120) – 4,62 ha; grądu środkowoeuropejskiego i subkontynentalnego (9170) – 2,37 ha; górskich i nizinnych torfowisk zasadowych o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (7230) – 1,22 ha. Ponadto pożar strawił szuwary i inne zbiorowiska roślinne.

Dane źródłowe i metodyka badań

Dane źródłowe

Danymi, które posłużyły do analizy procesu odnawiania się siedlisk przyrodniczych BbPN po pożarze były przede wszystkim zobrazowania satelitarne z konstelacji PlanetScope¹, które cechuje dość duża rozdzielczość przestrzenna, definiowana parametrem GSD (ang. Ground Sample Distance). W niniejszym opracowaniu wykorzystano produkty PS Ortho Tile Analytic SR (GSD = 3,125 m), a w jednym przypadku produkt PS Ortho Scene 4-band Analytic SR (GSD = 3 m). Produkty te są skorygowane ze względu na wpływ atmosfery i przeliczone do wartości współczynnika odbicia spektralnego na poziomie gruntu (ang. Surface Reflectance (SR)). Pobranie zobrazowań zrealizowano poprzez dostęp do konta edukacyjnego na platformie <https://www.planet.com/>. Do badań wybrano dane satelitarne we wszystkich, możliwie jak najbardziej bezchmurnych terminach, obejmujących okres od końca trwania pożaru (pierwsza dostępna data: 28 kwietnia) do połowy sierpnia 2020 r. Dodatkowo, dla zobrazowania stanu analizowanego obszaru sprzed pożaru, pobrano także zobrazowanie z 9 maja 2019 roku, które było najbliższe fazie fenologicznej okresu wystąpienia pożaru w roku 2020. Zestawienie pobranych danych satelitarnych przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Produkty PlanetScope wykorzystane w analizach.

Table 1. PlanetScope satellite products used in analysis.

Data rejestracji danych	Typ produktu	GSD
09.05.2019	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
28.04.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
08.05.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
14.05.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
27.05.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
01.06.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
08.06.2020	PS OrthoScene 4-band Analytic SR	3 m
28.06.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
04.07.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
18.07.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
26.07.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
06.08.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
13.08.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m
17.08.2020	PS OrthoTile Analytic SR	3,125 m

Dodatkowo w analizach wykorzystano dane pomocnicze, które stanowiły pliki wektorowe typu *Shapefile*, zawierające:

1. granice Biebrzańskiego Parku Narodowego i jego otuliny pobrane ze strony www Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska²,
2. zasięg obszaru objętego pożarem w 2020 r, pozyskany z europejskiego serwisu Copernicus Emergency Management Service (2025) (ID aktywacji: EMSR436)³,
3. granice siedlisk przyrodniczych obszarów Natura 2000, czterech obszarów szuwarów (bez gruntów prywatnych) oraz warstwę uzupełniającą zasięg łąk trzęślicowych (kod: 6410), pozyskane z Biebrzańskiego Parku Narodowego.

Metodyka opracowania

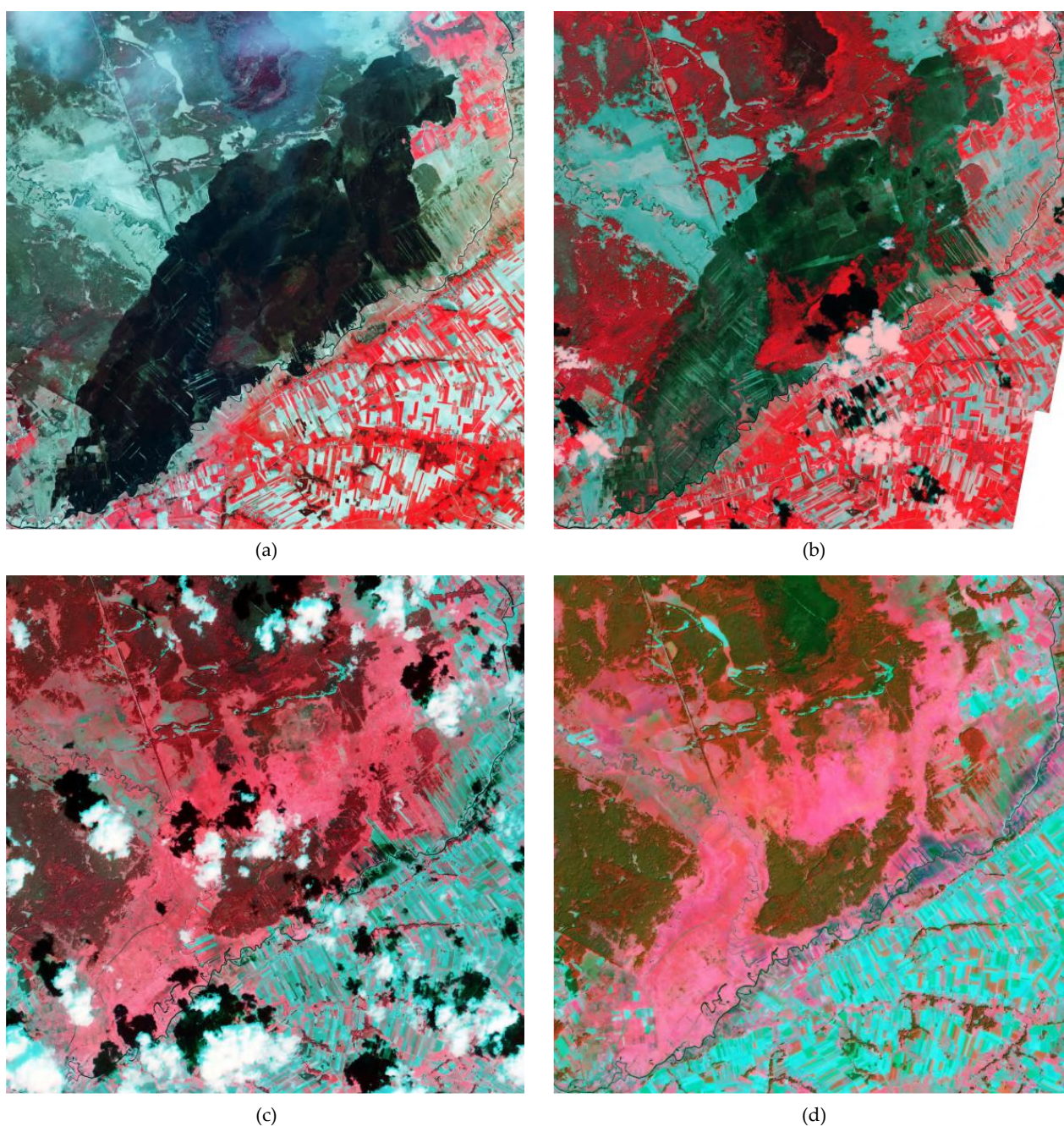
Pozyskane produkty obrazowe PlanetScope poddano przetwarzaniu wstępnemu, które obejmowało

¹ <https://www.planet.com/>

² <https://www.gov.pl/web/gdos/dostep-do-danych-geoprzestrzennych>

³ <https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/>

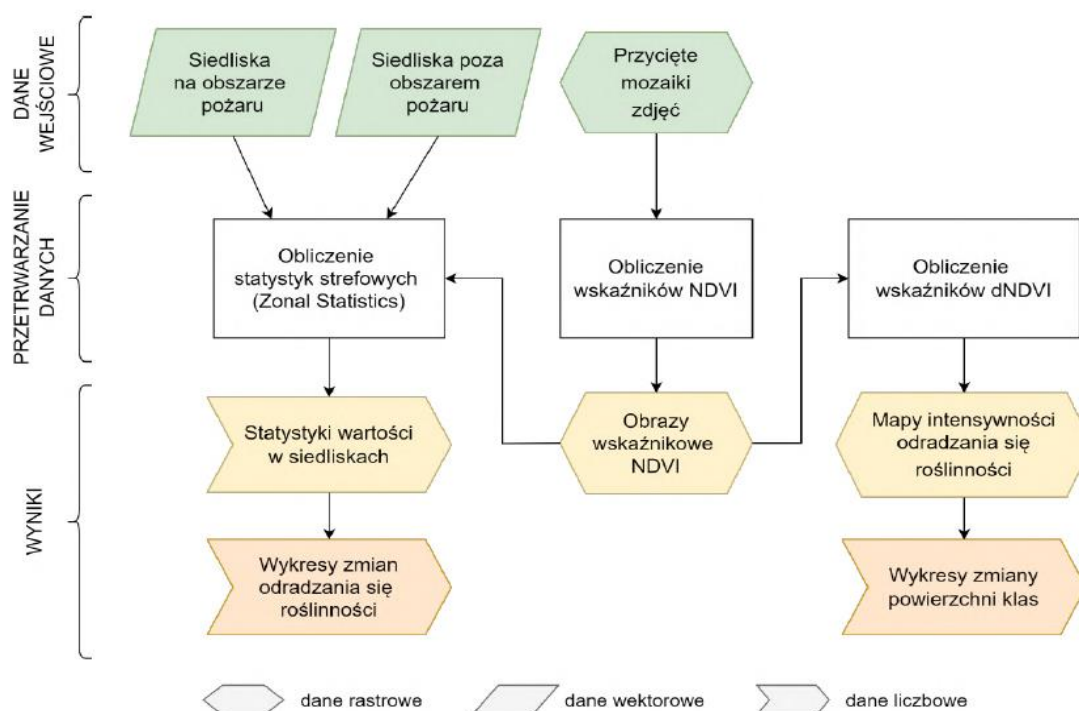
mozaikowanie scen satelitarnych z jednego terminu (Ryc. 3) oraz maskowanie, mające na celu wyeliminowanie obszarów pokrytych chmurami i ich cieniami. Od 2018 roku do 4-kanalowych produktów PlanetScope dołączane są maski chmur (UDM2, ang. Usable Data Masks), wygenerowane z wykorzystaniem technik uczenia maszynowego (Planet, 2021). Algorytm ten wciąż jest jednak w fazie udoskonalania i nie wszystkie rodzaje zachmurzenia (w szczególności typu Cirrus) są poprawnie maskowane. Po analizie udostępnionych masek chmur zdecydowano, że konieczne jest ich uzupełnienie w sposób manualny i dopiero tak uzupełnione maski zastosowano do wyeliminowania wpływu chmur i ich cieni na dalsze analizy. Ostatnim elementem wstępnego przetwarzania danych satelitarnych było przycięcie mozaik satelitarnych do granic pożarzyska oraz granic analizowanych siedlisk przyrodniczych Natura 2000.



Ryc. 3. Wybrane mozaiki obrazowań PlanetScope z: 28 kwietnia 2020 r. (a), 27 maja 2020 r. (b), 4 lipca 2020 r. (c), 6 sierpnia 2020 r. (d).

Fig. 3. Selected PlanetScope image mosaics from: April 28, 2020 (a), May 27, 2020 (b), July 4, 2020 (c), August 6, 2020 (d).

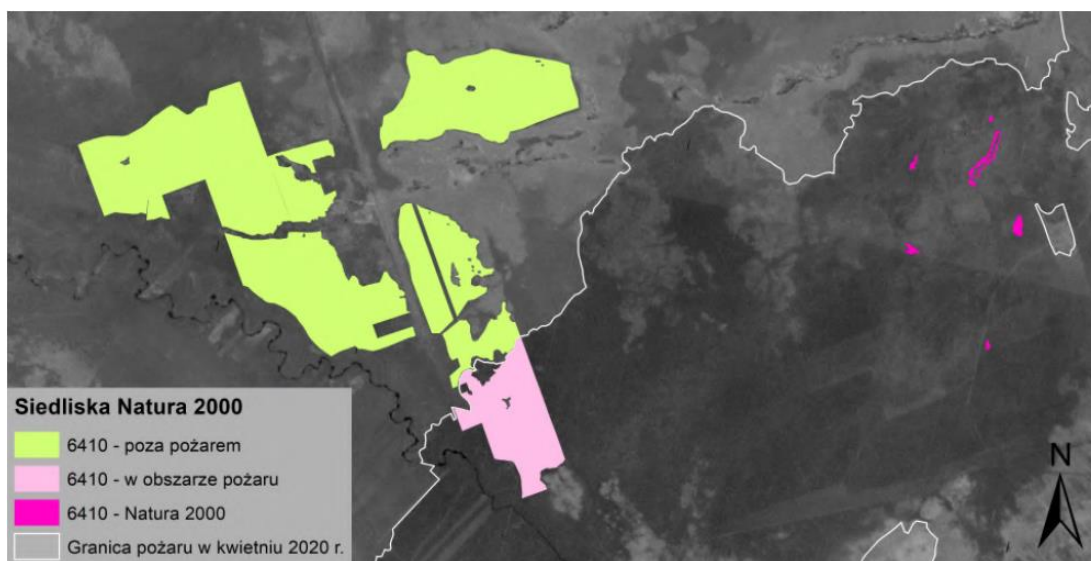
Analiza odnawiania się siedlisk przyrodniczych podzielona została na dwa etapy. Schemat przeprowadzenia obu etapów analizy odradzania się siedlisk ukazano na Ryc. 4.



Ryc. 4. Schemat realizacji badań.

Fig. 4. Research flowchart.

Pierwszy z nich polegał na porównaniu wartości NDVI poszczególnych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 na obszarach dotkniętych pożarem oraz poza nim w analizowanym okresie. W tym celu dla każdego siedliska znajdującego się na obszarze pożarzyska, wyznaczono jego odpowiednik (nazywane dalej siedliskiem referencyjnym) zlokalizowany poza obszarem pożarzyska (Ryc. 5), kierując się jak najmniejszą odległością od siedliska spalonego oraz jego jednorodnością. Dzięki takiemu podejściu zminimalizowano wpływ lokalnych uwarunkowań siedlisk na wartość NDVI oraz zapewniono możliwość porównania do naturalnego cyklu wegetacyjnego roślinności w danym roku. Następnie dla poszczególnych typów siedlisk przyrodniczych obliczono statystyki strefowe, charakteryzujące stan tych siedlisk w kolejnych fazach (terminach) odnawiania się. Dla każdego siedliska na podstawie rozkładów przestrzennych NDVI obliczono wartości: średnią, minimalną, maksymalną oraz odchylenie standardowe. Na podstawie obliczonych parametrów statystycznych przygotowano wykresy porównujące dynamikę rozwoju roślinności na siedliskach referencyjnych i siedliskach objętych pożarem.



Ryc. 5. Przykład porównywanych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 (kod siedliska: 6410).

Fig. 5. Example of compared Natura 2000 habitats (habitats code: 6410).

Drugi etap prac polegał na obliczeniu obrazów wskaźnikowych dNDVI dla par terminów:

- przed pożarem (9 maja 2019 roku) oraz niedługo po pożarze (8 maja 2020 r.),
- niedługo po pożarze (8 maja 2020 r.) oraz z widocznie odrodzoną roślinnością (18 lipca 2020 r.).

Powstałe w ten sposób obrazy wskaźnikowe poddane zostały reklasyfikacji według skali zaproponowanej w opracowaniu International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping (IWG-SEM, 2018), przedstawionej w Tabeli 2. Na tej podstawie oszacowano powierzchnię siedlisk przyrodniczych w podziale na klasy intensywności pożaru i ich udział w ogólnej powierzchni siedlisk objętych pożarem w 2020 r. W drugim wariancie porównania (pomiędzy 8 maja a 18 lipca 2020 r.) określono klasy intensywności/stopnia odradzania się roślinności.

Tabela 2. Podział klas intensywności pożaru według wskaźnika dNDVI (IWG-SEM, 2018).

Table 2. Fire severity class description and corresponding dNDVI values. (IWG-SEM, 2018).

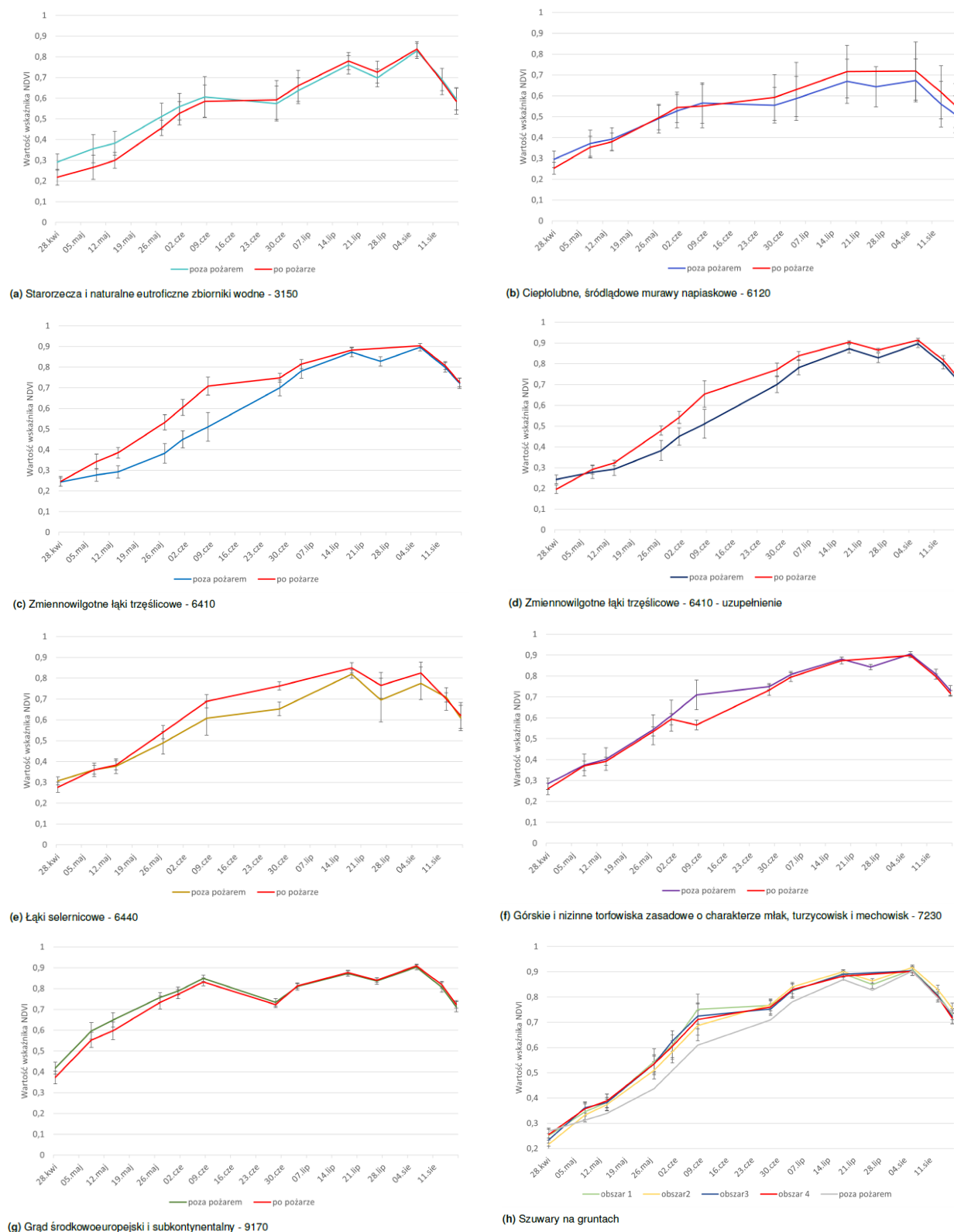
dNDVI	Klasa intensywności pożaru <i>Fire severity class description</i>
$dNDVI \leq 0.3$	Niska intensywność data <i>Low fire severity</i>
$0.3 > dNDVI \leq 0.55$	Umiarkowana intensywność <i>Moderate fire severity</i>
$dNDVI > 0.55$	Wysoka intensywność <i>High fire severity</i>

Wyniki

Efektem analizy odradzania się roślinności były w pierwszej kolejności wykresy porównawcze wartości średnich NDVI dla siedlisk przyrodniczych objętych pożarem i siedlisk referencyjnych, zlokalizowanych poza jego zasięgiem (Ryc. 6). Charakterystyczną tendencją badanych siedlisk, zauważoną na wykresach, był szybki przyrost wartości NDVI w przypadku siedlisk objętych pożarem w porównaniu do siedlisk referencyjnych, które ominął żywioł. Wynika to z cech wskaźnika NDVI, który wskazuje na żywotność roślinności i dobrze obrazuje zwiększanie jej biomasy. Tę tendencję zaburza jednak wiele czynników, wynikających zarówno z cech terenu, jak również metodyki przetwarzania danych. Widoczne m.in. „załamanie” linii łamanej w dniu 8 czerwca dla siedliska 7230 – górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (Ryc. 6 (f)) wynika ze zbyt małej powierzchni analizowanego terenu, który został ograniczony przez występowanie chmur na obrazie z tego terminu. Piksele, które podlegały analizie nie reprezentują zatem obiektywnej wartości średniej NDVI dla tego siedliska i tym należałoby tłumaczyć spadek wartości NDVI w tym terminie. Podobny problem wystąpił dla danych z 28 czerwca 2020 r. w odniesieniu do grądu środkowoeuropejskiego i subkontynentalnego (9170). W tym przypadku spadek wartości NDVI zaobserwowano zarówno dla obszaru spalonego, jak i niespalonego siedliska referencyjnego (Ryc. 6 (g)).

Na podstawie analizy wykresów porównawczych wartości NDVI (Ryc. 6) stwierdzono, że w przypadku:

- siedliska 3150 – Starorzeczka i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne – roślinność na obszarze spalonym szybko się odradzała i 28 czerwca nastąpiło zrównanie wartości średniej NDVI dla siedlisk objętych pożarem i zlokalizowanych na obszarze poza oddziaływaniem pożaru. W kolejnych tygodniach (od 28 czerwca do 6 sierpnia) roślinność na pogorzelsku rozwijała się nieco lepiej niż na terenie zlokalizowanym poza pożarzyskiem, a po 9 sierpnia różnica wartości NDVI na porównywanych siedliskach zatarła się. Wielkość odchylenia standardowego NDVI była zbliżona dla obu porównywanych obszarów.
- siedliska 6120 – Ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe – roślinność intensywnie odradzanie rozpoczęła po 16 czerwca, co obrazuje wzrost wartości średniej NDVI dla obszaru po pożarze. Regeneracja siedlisk następowała wolniej niż w przypadku siedlisk wilgotnych, jednak od 16 czerwca, przez kolejne tygodnie, wartości NDVI były wyższe w porównaniu do siedliska referencyjnego.
- siedliska 6410 – Zmiennowilgotne łąki trześlicowe – zaobserwowano intensywnie odradzanie roślinności już od 8 maja, od kiedy to średnia wartość NDVI na terenie objętym pożarem rosła i utrzymywała się na znacznie wyższym poziomie niż w przypadku siedlisk referencyjnych, zlokalizowanych poza obszarem pożarzyska, co miało miejsce aż do drugiej połowy lipca. Od trzeciej dekady lipca nastąpiło zrównanie wartości średniej NDVI dla obu porównywanych obszarów. Cechą charakterystyczną jest także stosunkowo mała zmienność wartości NDVI (wartość odchylenia standardowego) dla siedlisk położonych na terenie pożarzyska. Można to wyjaśnić tym, że na terenie pożarzyska spłonęła część nadziemna pozostałości roślinności z poprzedniego sezonu, co wpłynęło na zwiększenie homogeniczności powierzchni siedlisk. Natomiast na siedliskach referencyjnych odpowiedź spektralna pochodziła zarówno od roślinności świeżo rozwijającej się, jak i od resztek roślinnych z poprzedniego sezonu, co wpływało na obserwowaną niższą wartość wskaźnika.



(a)

(b)

Ryc. 6. Porównanie przebiegu zmienności NDVI analizowanych siedlisk przyrodniczych Natura 2000 na obszarach objętych pożarem i poza nim w okresie kwiecień – sierpień 2020 r.

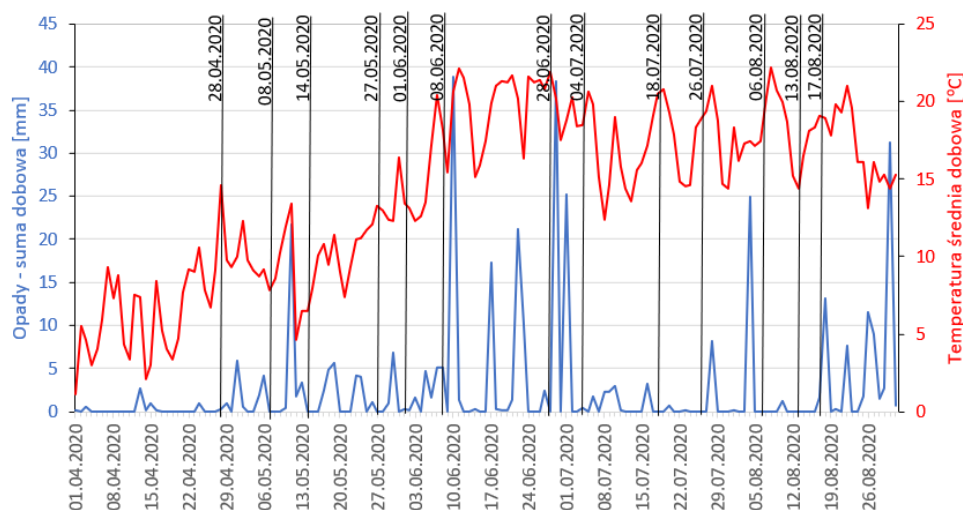
Fig. 6. Comparison of the NDVI variability of the analyzed Natura 2000 natural habitats in the fire-affected and non-fire-affected areas in the period April–August 2020.

- siedliska 6440 – Łąki selernicowe – podobnie jako w przypadku zmiennowilgotnych łąk trzęślicowych, zaobserwowano, że intensywny rozwój roślinności nastąpił dość szybko (od 8 maja), co uwidoczniło się

w wysokim poziomie wartości średniej NDVI przez cały analizowany okres. Dopiero w sierpniu wartości średnie NDVI dla obszaru pożarzyska i terenu poza nim zrównały się. W przypadku tego siedliska zmienność wartości NDVI była mniejsza na terenie objętym pożarem niż na obszarze, którego pożar nie dotknął, co wynika z faktu, że na siedliskach zlokalizowanych na pożarzysku wartość odbicia spektralnego pochodziła głównie od rozwijającej się roślinności, zaś w przypadku siedlisk referencyjnych wpływ na wartość wskaźnika miała zarówno roślinność świeżo rozwijająca się, jak i resztki roślinności z poprzedniego sezonu.

- siedliska 7230 – Górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk – stwierdzono najmniejszą różnicą w poziomie wartości średniej NDVI w siedlisku zlokalizowanym na obszarze spalonym i siedlisku referencyjnym, zlokalizowanym poza zasięgiem pożaru, jak również niewielkim odchyleniem standardowym. Było to jedyne siedlisko, gdzie wartość średnia NDVI dla siedliska położonego na pogorzelisku była nieco niższa w porównaniu do siedliska referencyjnego przez cały analizowany okres, przy czym różnica ta była bardzo mała.
- siedliska 9170 – Grąd środkowoeuropejski i subkontynentalny – rozwój roślinności następował powoli. Wzrost wartości NDVI następował w podobnej dynamice zarówno na terenie objętym pożarem, jak i w przypadku siedliska referencyjnego. Zrównanie wartości średnich NDVI nastąpiło dopiero z początkiem lipca. Warto nadmienić, że w przypadku drzewostanów leśnych regeneracja następuje wolniej niż ma to miejsce w przypadku roślinności niskiej. Obserwowane zrównanie średnich wartości NDVI może wynikać z odrodzenia się roślinności niskiej, a nie z regeneracji drzew.
- szuwarów na gruntach na każdym z czterech analizowanych obszarów stwierdzono zbliżone wartości średnie NDVI. Wartości wskaźnika potwierdzają, że odradzanie się roślinności następowała od początku maja i do sierpnia średnia wartość NDVI była wyższa na każdym z czterech analizowanych obszarów szuwarów zlokalizowanych na terenie pożarzyska niż w przypadku szuwarów rozwijających się poza terenem objętym zasięgiem pożaru. Sytuację tę można wyjaśnić tym, że w przypadku terenów pożarzyska spłonęła cała lub większość nadziemnej części roślinności, w tym zeszłoroczne pozostałości szuwarów, co wpłynęło na zwiększenie obserwowanej wartości NDVI. W przypadku szuwarów znajdujących się poza oddziaływaniem pożaru na wartość odbicia spektralnego wpływała zarówno świeża roślinność, jak i pozostałości z poprzedniego sezonu wegetacyjnego, które obniżały wartość wskaźnika.

Poza zróżnicowanym tempem odradzania się poszczególnych typów siedlisk przyrodniczych, na wszystkich wykresach (Ryc. 6) widoczny jest spadek wartości wskaźnika NDVI w dniu 26 lipca. Jak wynika z archiwalnych danych meteorologicznych prezentowanych w portalu Meteomodel⁴ (stacja Biebrza), okres od 2 do 28 lipca przyniósł łącznie jedynie 13,8 mm opadów przy dość wysokich średnich dobowych temperaturach powietrza (Ryc. 7). Można więc przypuszczać, że czynnik długotrwałej suszy doprowadził do pogorszenia warunków wegetacji roślinności, co przełożyło się na obniżenie obserwowanych wartości NDVI, a następnie ich wzrost po regeneracji roślinności, spowodowanej opadami deszczu w dniach 28 lipca (8,2 mm) oraz 4 sierpnia (24,9 mm).



Ryc. 7. Zmienność sumy opadów dobowych oraz średniej dobowej temperatury powietrza na stacji Biebrza w okresie kwiecień – sierpień 2020 r. Na wykresie naniesiono daty terminów analizowanych obrazowań PlanetScope (opracowano na podstawie danych z serwisu <https://dane.meteomodel.pl/#>)

Fig. 7. Variability of the total daily precipitation and the average daily air temperature at the Biebrza station in the period April – August 2020. The chart also shows the dates of the analyzed PlanetScope images (prepared based on data from the website <https://dane.meteomodel.pl/#>).

⁴ <https://dane.meteomodel.pl/#>

Analiza różnicy średnich wartości NDVI na obszarze spalonym i niespalonym, przedstawiona na Ryc. 6 pozwoliła ustalić istotne cechy różniące proces odradzania się roślinności w poszczególnych siedliskach. Zmiennowilgotne łąki trzęslicowe (6410) charakteryzowały się najbujniejszym odrodzeniem roślinności po pożarze. Drugie, pod względem do tempa regeneracji roślinności były łąki selernicowe (6440) oraz szuwały. Siedliskiem, które cechowało się największym spadkiem wartości NDVI na obszarze pożaru, jak również najpowszechniejszym jej odradzaniem były starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (3150).

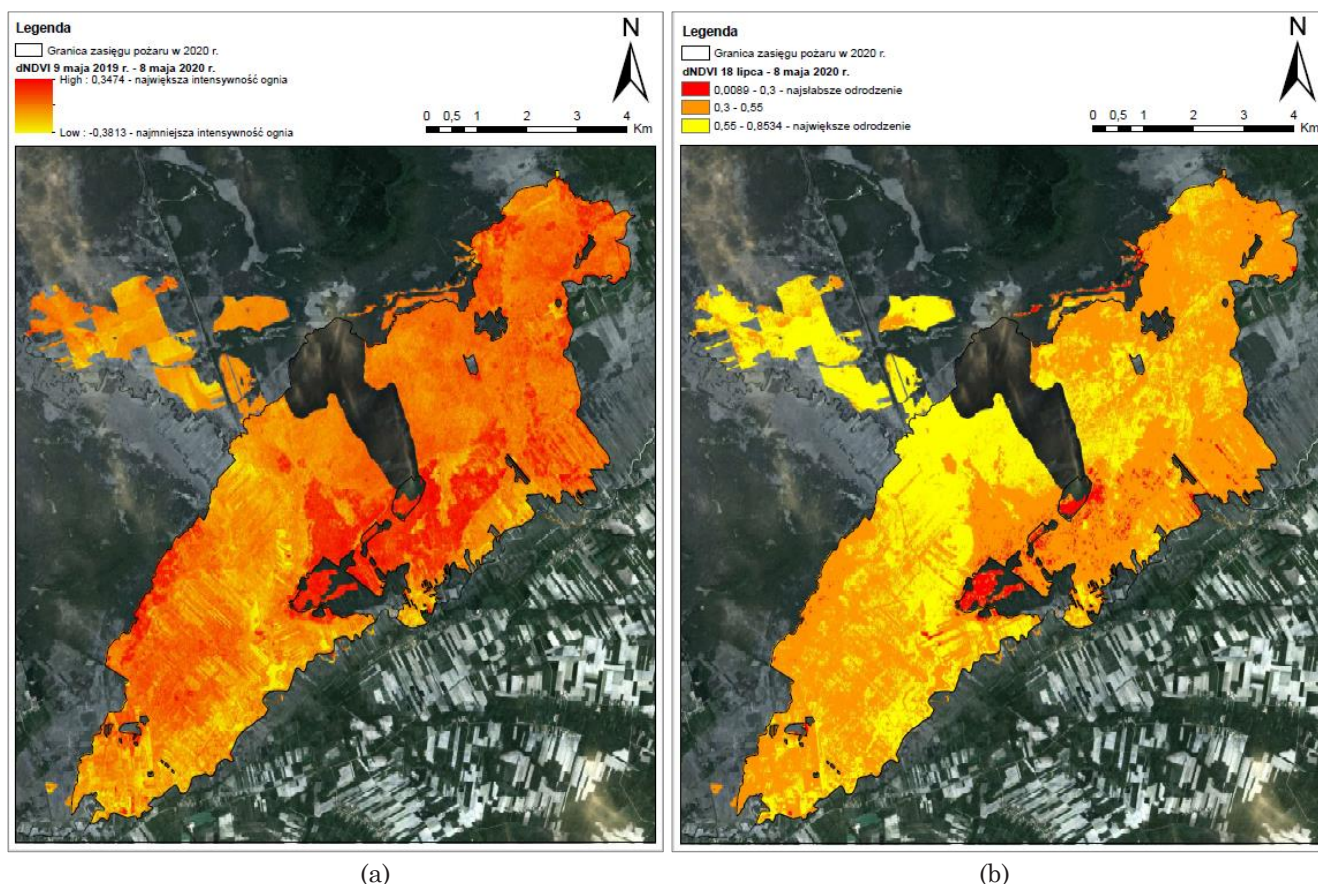
Efektom drugiego etapu prac są obrazy wskaźnikowe dNDVI dla par terminów:

- przed pożarem (9 maja 2019 roku) oraz niedługo po pożarze (8 maja 2020 r.) (Ryc. 8a),
- niedługo po pożarze (8 maja 2020 r.) oraz z widocznie odrodzoną roślinnością (18 lipca 2020 r.) (Ryc. 8b).

oraz oszacowanie powierzchni siedlisk przyrodniczych w podziale na klasy intensywności pożaru/ognia i ich udział w ogólnej powierzchni siedlisk objętych pożarem w 2020 r. (w odniesieniu do pary obrazów z 9 maja 2019 r. i 8 maja 2020 r.), jak również w podziale na klasy intensywności odradzania się roślinności (w przypadku pary obrazów z 8 maja i 18 lipca 2020 r.).

Analizując rozkład dNDVI dla pary obrazów zarejestrowanych przed pożarem (9 maja 2019 roku) oraz niedługo po pożarze (8 maja 2020 r.) (Ryc. 8a) można stwierdzić, że pożar o największej intensywności wystąpił w środkowej części obszaru objętego pożarem, jednak wg skali zaproponowanej przez IWG-SEM (2018, Tabela 2) jest to poziom określany jako umiarkowana intensywność pożaru. Na pozostałym terenie intensywność pożaru można określić jako niską. Uzyskane wyniki mogą być obciążone pewną dozą niepewności, wynikającą z faktu porównywania obrazów pozyskanych co prawda z tego samego okresu roku, jednak mimo to rozwój roślinności w roku 2019 r. mógł być w innej fazie rozwoju w porównaniu do roku 2020.

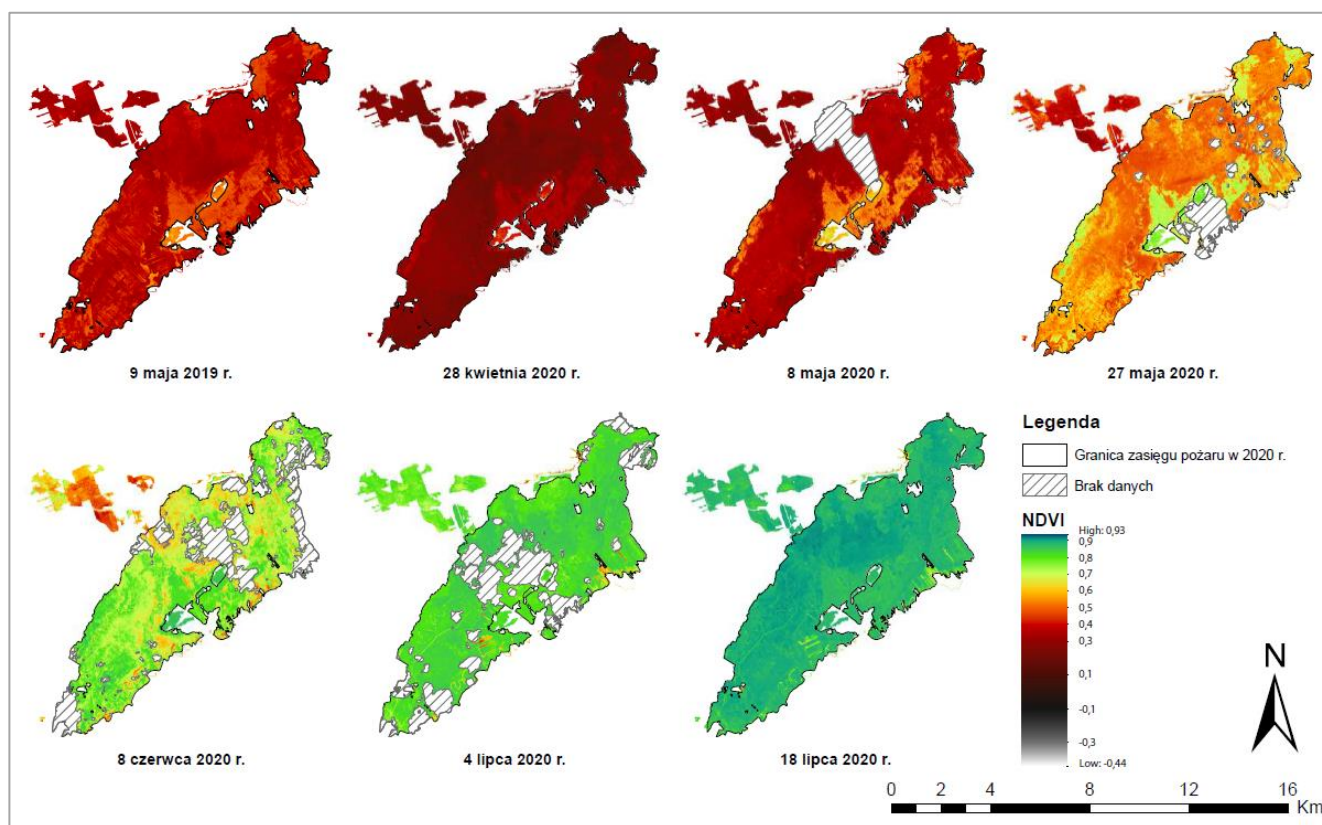
Rozkład wskaźnika dNDVI opracowany dla przypadku pary obrazów z 8 maja i 18 lipca 2020 r. (Ryc. 8b) ukazuje z kolei intensywność odradzania się roślinności na obszarze pożarzystym. Zauważalna jest intensywna regeneracja siedlisk w miejscach, gdzie intensywność pożaru (Ryc. 8a) była najmniejsza. Natomiast na terenie, gdzie ogień miał największą intensywność, czyli na obszarach najsilniej zdegradowanych, roślinność odradzała się zdecydowanie wolniej (Ryc. 8b).



Ryc. 8. (a) Rozkład dNDVI między 9 maja 2019 r. i 8 maja 2020 r. na obszarze pożaru w Biebrzańskim Parku Narodowym w podziale na klasy intensywności ognia (uszkodzenia roślinności); (b) rozkład dNDVI między 8 maja i 18 lipca 2020 r. na obszarze pożaru w Biebrzańskim Parku Narodowym w podziale na klasy intensywności regeneracji roślinności.

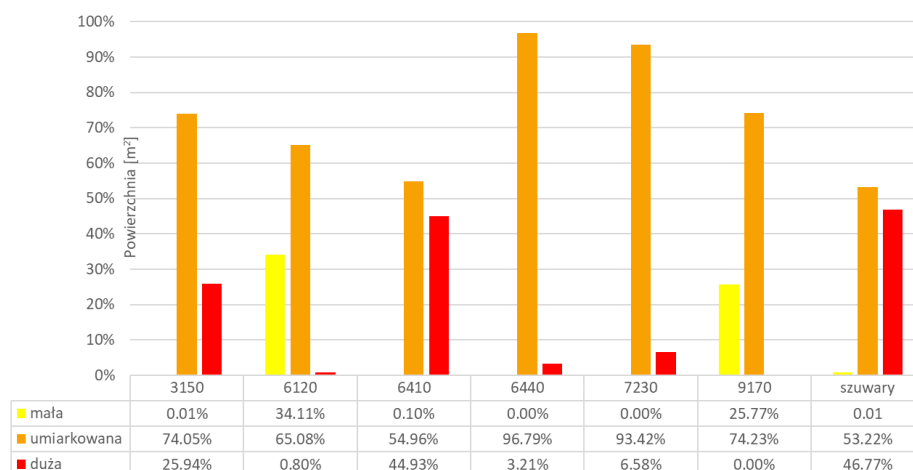
Fig. 8. (a) dNDVI map between 9 May 2019 and 8 May 2020 in the fire area in the Biebrza National Park, divided into fire intensity classes (vegetation damage); (b) dNDVI map between 8 May and 18 July 2020 in the fire area in the Biebrza National Park, divided into vegetation regeneration intensity classes.

Na Ryc. 9 przedstawiono porównanie zmienności rozkładów przestrzennych NDVI w okresie od 9 maja 2019 r. do 18 lipca 2020 r. Analizując je można stwierdzić, że regeneracja siedlisk następowała w różnym tempie w zależności od stopnia intensywności ognia w danym miejscu. Na zobrażowaniach z maja widoczne jest szybkie odradzanie siedlisk na terenie o najniższym stopniu zniszczeń, natomiast obraz z 8 czerwca potwierdza, że na zdecydowanej większości obszaru objętego pożarem roślinność odrodziła się, a w połowie lipca praktycznie cały obszar jest pokryty roślinnością, co potwierdzają wysokie wartości NDVI (0,7-0,9). Potwierdza to także wykres przedstawiony na Ryc. 10, gdzie oszacowano udział siedlisk objętych pożarem w 2020 r. w ogólnej powierzchni pożarzyska, w podziale na klasy intensywności odradzania się. Większość powierzchni analizowanych siedlisk przyrodniczych w dniu 18 lipca 2020 r. charakteryzowała się dużym lub umiarkowanym stopniem regeneracji. Najszybciej odradzającymi się siedliskami Natura 2000 były zmiennowilgotne łąki trześlicowe (6410), starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (3150) oraz szuwały, zaś najwolniej odnawiały się ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe (6120) i grąd środkowoeuropejski i subkontynentalny (9170). W przypadku siedliska ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe 34,11% ich powierzchni na terenie pożarzyska cechowała mała intensywność odradzania się roślinności, a w odniesieniu do grądu środkowoeuropejskiego i subkontynentalnego było to 25,77% powierzchni. Pozostałe siedliska – łąki selernicowe (6440) i górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (7230) – na większości obszaru objętego pożarem charakteryzowały się umiarkowanym stopniem regeneracji roślinności.



Ryc. 9. Porównanie zmienności rozkładów przestrzennych NDVI w okresie od 9 maja 2019 r. do 18 lipca 2020 r.

Fig. 9. Comparison of variability of NDVI spatial distributions in the period from May 9, 2019, to July 18, 2020.



Ryc. 10. Stopień regeneracji roślinności w badanych siedliskach Natura 2000.

Fig. 10. Degree of vegetation regeneration in Natura 2000 habitats studied.

Dyskusja

W celu oceny skutków pożaru w Biebrzańskim Parku Narodowym w 2020 r. różne środowiska naukowe podjęły wielowarstwowe badania i objęły one praktycznie wszystkie elementy ekosystemu zarówno biotyczne, jak i abiotyczne. Głównym projektem badawczym dotyczącym tej tematyki jest projekt pn. „Biebrza po pożarze – wpływ pożaru na wybrane elementy przyrodnicze Biebrzańskiego Parku Narodowego” w sezonie wegetacyjnym 2020 r. (etap I) został dofinansowany ze środków Funduszu Leśnego przez Lasy Państwowe w ramach umowy z Biebrzańskim Parkiem Narodowym, a jego realizacji podjęli się naukowcy z Instytutu Badawczego Leśnictwa oraz Instytutu Biologii Ssaków PAN (Wiatr, 2021). Badania zaplanowano na 5 lat. Z dotychczasowych prac zaraportowanych w kolejnych edycjach Kroniki Biebrzańskiego Parku Narodowego (Wiatr, 2021; Wiatr, 2022; Lićwinko, 2023; Lićwinko, 2024; Satkiewicz, 2025) wynika, że pożar w Biebrzańskim Parku Narodowym, który w kwietniu 2020 r. i objął swym zasięgiem ponad 5000 ha nie wpłynął znacząco na przyrodę Parku i po 3 latach zaburzenie wywołane nim w ekosystemie ustabilizowało (Lićwinko, 2023). W pierwszym roku po pożarze zaobserwowano, że poza olsami i brzezunami wskutek pożaru obumarła większość drzew i krzewów wkrótce odnowiła się wegetatywnie. Stopień pokrycia roślinności runa po pożarze był istotnie mniejszy niż obserwowany na powierzchniach przed pożarem (BbPN, 2021). Znaczny negatywny skutek pożaru zaobserwowano w przypadku warstwy mszaków, których przeciętne pokrycie i liczba gatunków były niższe niż przed pożarem. Jednocześnie pojawiły się gatunki mszaków, które preferują pożarzyska (BbPN, 2021). Stwierdzono jednak, że pożar nie wpłynął znacząco na zmiany w różnorodności gatunkowej ptaków w Biebrzańskim Parku Narodowym, bogactwo gatunkowe ptaków obserwowane w latach 2015 i 2020 było podobne, a liczebność była wyższa w roku 2020 (Wiatr, 2021). Mimo to wśród ptaków w sezonie lęgowym 2020 r. stwierdzono jednoznacznie negatywny wpływ na 14 gatunków ptaków, które przystąpiły już do lęgów, a w przypadku skowronka, świergotka łąkowego i świergotka drzewnego zaobserwowano wzrost ich liczebności. W roku 2021 natomiast niemal wszystkie te udokumentowane wpływy uległy całkowitemu lub częściowemu zatarciu (Wiatr, 2022). Prowadzone prace badawcze wykazały również występowanie kilku bardzo cennych gatunków chrząszczy, których wcześniej nie obserwowano. Jednym z nich jest pirofilny gatunek *Lepturalia nigripes*, którego występowanie zostało stwierdzone w Polsce po raz pierwszy od 80 lat (Lićwinko, 2023). Naukowcy przypuszczają, że był on obecny w środowisku, ale ze względu na tryb życia i preferencje siedliskowe był niewykrywalny przez badaczy (Lićwinko, 2023). Po trzech latach badań stwierdzono, że wpływ pożaru na system korzeniowy olsz jest znacznie większy niż to zakładano na etapie badań wstępnych i z biegiem czasu osłabienie i zamieranie drzew postępuje, na co wpływ mogą mieć również warunki klimatyczne (Lićwinko, 2024).

Badania przeprowadzone metodami teledetekcji satelitarnej w ramach niniejszej pracy potwierdziły obserwacje prowadzone w terenie, że skutki pożaru w szacie roślinnej były stosunkowo krótkotrwałe, a tempo jej regeneracji zależało od rodzaju siedliska przyrodniczego. W przypadku siedlisk wilgotnych, takich jak zmiennowilgotne łąki trzęślicowe (6410), czy łąk selerenicowych (6440) ich odrodzenie nastąpiło szybko, na co wskazują wysokie wartości NDVI, które już od połowy maja były wyższe na terenie pożarzyska w porównaniu do wartości obserwowanych na terenie siedlisk referencyjnych. Tak szybkie odrodzenie się roślinności wynika z faktu, że pożar miał charakter powierzchniowy i stosunkowo szybko go ugaszono. Nie doszło do zapalenia się torfu, co skutkowałoby bardzo duże, niekorzystne zmiany siedliskowe. Pomimo trwającej dotkliwej suszy, bagna wciąż zawierały wodę gruntową, która nie pozwoliła na głębokie wypalenie torfu (Wiatr, 2021). W przypadku siedlisk suchszych, jak ciepłolubne, śródładowe murawy napiaskowe (6120) ich regeneracja następowała wolniej i przez długi czas wartości NDVI były zbliżone niezależnie od tego czy siedlisko zostało objęte pożarem czy nie. Wpływ na to miała prawdopodobnie susza, która od dłuższego czasu oddziałuje na stan siedlisk w Biebrzańskim Parku Narodowym, jak i jego podatność na występowanie pożarów. Do początku czerwca odradzanie roślinności miało charakter monotoniczny niezależnie od

siedliska, jednak w późniejszym okresie obserwowany był spadek tempa regeneracji roślinności, na co wpływ miała wilgotność gleb, szczególnie widoczna w przypadku siedlisk wilgotnych. Badania fitosocjologiczne, przeprowadzone w roku 2020 w ramach projektu pn. „Biebrza po pożarze – wpływ pożaru na wybrane elementy przyrodnicze Biebrzańskiego Parku Narodowego” nie wykazały istotnego wpływu pożaru na zmiany liczby gatunków roślin podlegających ochronie ścisłej, jednak wskazały na spadek wilgotności gleb (Wiatr, 2021). Dopiero intensywniejsze opady pod koniec lipca ponownie spowodowały wzrost roślinności.

W efekcie przeprowadzonych badań stwierdzono, że na większości obszaru objętego pożarem stopień degradacji roślinności był umiarkowany. Potwierdzają to także wyniki analiz przeprowadzonych przez Gadawską i in. (2020), w których do oceny stopnia degradacji roślinności wskutek pożaru wykorzystano wskaźnik Δ NBRT1, który z kolei bazuje na ulepszonej wersji wskaźnika NBR, czyli wskaźniku NBRT1 (ang. Normalized Brun Ratio Thermal 1), do którego obliczenia wykorzystuje się kanały spektralne podczerwieni bliskiej (NIR), krótkiej (SWIR) oraz ciepłej (TIR). Wykorzystując dane satelitarne Landsat 8 opracowana została mapa degradacji roślinności wypalanej, gdzie wydzielono 4 klasy degradacji roślinności (mała, umiarkowanie mała, umiarkowanie duża i duża). Porównując oba opracowania widoczne są różnice w rozkładzie terenów o różnym stopniu degradacji, co wynika z dwóch kwestii. Po pierwsze z metodyki opracowania, czyli wskaźnika spektralnego wykorzystanego w analizach. W niniejszym opracowaniu był to dNDVI, a w przypadku pracy Gadawskiej i in. (2020) był to Δ NBRT1, zatem korzystano z innych zakresów promieniowania do oszacowania stopnia degradacji roślinności. Drugim powodem jest różnica w datach porównywanych obrazów. W przypadku niniejszych badań obrazem odniesienia było zobrazowanie z 9 maja 2019 r. (vs. 8 maja 2020 r.), natomiast w pracy Gadawskiej i in. (2020) było to zobrazowanie z 30 czerwca 2019 r. (vs. 15 maja 2020 r.). Wydaje się, że zobrazowanie z końca czerwca 2019 r. jest zbyt odległe od faktycznej fazy fenologicznej roślinności odpowiadającej stanowi rozwoju z przełomu kwietnia i maja, kiedy to miał miejsce pożar w roku 2020. Biorąc pod uwagę fakt, że od kilku lat na obszarze Biebrzańskiego Parku Narodowego występuje susza, a dodatkowo rok 2019 w Polsce był wyjątkowo ciepły i suchy (zanotowano rekordowo wysoką średnią roczną temperaturę, najwyższą w historii pomiarów instrumentalnych), istotny wpływ na uzyskane rezultaty może mieć właśnie dobór obrazu odniesienia (przed pożarem). Dodatkowo, analizując dane meteorologiczne z roku 2019, udostępniane w serwisie MetoModel.pl (stacja BIEBRZA (253220070)), można zauważyć, że czerwiec 2019 r. był rekordowo ciepły (średnia temperatura powietrza: 27°C). Dodatkowo między 21 a 30 czerwca sumaryczny opad deszczu wyniósł jedynie 4 mm. Z dużą dozą pewności można zatem stwierdzić, że zobrazowanie z 30 czerwca 2019 r. mogło znacząco wpłynąć na wyniki oceny stopnia degradacji roślinności w opracowaniu Gadawskiej i in. (2020). Wpływ na uzyskane wyniki miała także rozdzielczość przestrzenna obrazów, ponieważ w przypadku prezentowanych badań zastosowano zobrazowania satelitarne PlanetScope o znacznie wyższej rozdzielczości przestrzennej (GDS ~ 3 m), w porównaniu do danych LANDSAT 8 (GSD = 30 m w odniesieniu do NIR i SWIR oraz GSD = 100 m w przypadku TIR), zastosowanych w przytoczonej wyżej pracy. Warto byłoby zatem przeprowadzić badania porównawcze z wykorzystaniem zobrazowań satelitarnych z systemu LANDSAT 8/9 z terminów zbliżonych do dat rejestracji obrazów PlanetScope analizowanych w niniejszym opracowaniu. Wówczas wyeliminowano by lub ograniczono by wpływ opisanych wyżej czynników.

Wnioski

Celem przeprowadzonych badań było określenie dynamiki odradzania się poszczególnych typów siedlisk przyrodniczych Natura 2000 po pożarze, jak również ocena przydatności obrazów PlanetScope do tego celu. W efekcie przeprowadzonych analiz stwierdzono, że zmiennowilgotne łąki trzęślicowe (6410) charakteryzowały się najbujniejszym odrodzeniem roślinności po pożarze. Drugie, pod względem do tempa regeneracji roślinności były łąki selernicowe (6440) oraz szuwały. Siedliskiem, które cechowało się największym spadkiem wartości NDVI na obszarze pożaru, jak również najpowolniejszym jej odradzaniem były starorzecza i naturalne eutroficzne zbiorniki wodne (3150). Wolno regenerowały się także ciepłolubne, śródlądowe murawy napiaskowe (6120). Zauważono także, że w przypadku większości siedlisk Natura 2000 wartości średnie wskaźnika NDVI na obszarze spalonym były wyższe niż w siedliskach referencyjnych zlokalizowanych poza obszarem pożaryzyska. Jedynie górskie i nizinne torfowiska zasadowe o charakterze młak, turzycowisk i mechowisk (7230) oraz grąd środkowoeuropejski i subkontynentalny (9170) cechowały niższe wartości NDVI na terenie pożaryzyska, co świadczy o słabszej regeneracji roślinności w przypadku tych siedlisk.

Satelity PlanetScope, ze względu na ich dużą rozdzielczość przestrzenną (GSD ~ 3 m) i praktycznie codzienną rejestrację obrazów stanowią doskonałe źródło danych do analiz przyrodniczych, w tym tych dotyczących badania tempa regeneracji roślinności po zaburzeniach różnego rodzaju (np. pożary, powodzie).

Author Contributions: Conceptualization, J.C., A.R. and K.O-S.; methodology, J.C., A.R. and K.O-S.; formal analysis, J.C. and K.O-S.; investigation, J.C. and K.O-S.; data curation, J.C., A.R.; writing— K.O-S. and J.C.; writing—review and editing, K.O-S. and A.R.; visualization, J.C. and K.O-S.; supervision, K.O-S. and A.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- BbPN, Biebrza – rok po pożarze, Biebrzański Park Narodowy, 2021. Available on-line: <https://archiwum2.biebrza.org.pl/plik,5041,prezentacja-biebrza-rok-po-pozarze-pdf.pdf> (accessed on 05.11.2025).
- BbPN, Biebrzański Park Narodowy, 2023, www.biebrza.org.pl.
- Ceranka Joanna, 2022, Analiza dynamiki odnawiania się siedlisk przyrodniczych w Biebrzańskim Parku Narodowym po pożarze w roku 2020, praca dyplomowa.
- Copernicus, 2025, <http://sentinels.copernicus.eu>. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>.
- Emergency Management Service, 2025, <https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/> (accessed on 05.11.2025).
- Copernicus Emergency Management, 2025, <https://mapping.emergency.copernicus.eu/activations/> (accessed on 05.01.2025).
- Escuin, S.; Navarro, R.; Fernandez, P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing* 2008, 29(4), pp. 1053-1073. DOI: 10.1080/01431160701281072.
- Gadawska, A.; Dembińska, A., Milczarek, M. Wskaźnik intensywności ognia dla pożaru w Biebrzańskim Parku Narodowym, *Arcana GIS*, październik 2020. Available on-line: <https://www.arcanagis.pl/wskaznik-intensywnosci-ognia-dla-pozaru-w-biebrzanskim-parku-narodowym/> (accessed on 05.01.2025).
- GDOŚ, 2024. Obszary Natura 2000. Generalna Dyrekcja Ochrony Środowiska. Available on-line: <https://natura2000.gdos.gov.pl/> (accessed on 05.01.2025).
- Huete, A.R.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment* 2002, 83(1–2), pp. 195–213.
- IWG-SEM, 2018. International Working Group on Satellite-based Emergency Mapping. Fire Mapping Chapter, October (2018), p. 12. Available online: https://www.un-spider.org/sites/default/files/IWG_SEM_Guidelines_Fire_chapter_SERTIT_2_0.pdf (accessed on 05.01.2025).
- Kalbarczyk, E. Parki narodowe w Polsce. Bielsko-Biała: Wydawnictwo Dragon, 2016. ISBN: 9788378872689.
- Key, C.H.; Benson, N.; Ohlen, D.; Howard, S.; McKinley, R.; Zhu Z. The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation, In *Proceedings of the Ninth Forest Service Remote Sensing Applications Conference*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, San Diego, CA, 8-12 April, 2002.
- Lićwinko, M. (red.), Kronika Biebrzańskiego Parku Narodowego 2022 r., Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza, 2023. ISBN: 978-83-60774-32-8. Available on-line: <https://bbpn.gov.pl/pliki-do-pobrania/pobierz/836f20ca-b08c-4d13-ba1c-bfd326892595.pdf> (accessed on 05.10.2025).
- Lićwinko, M. (red.), Kronika Biebrzańskiego Parku Narodowego 2023 r., Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza, 2024. ISBN: 978-83-60774-35-9. Available on-line: <https://bbpn.gov.pl/pliki-do-pobrania/pobierz/2edfa4cf-b767-411b-9062-1eb4fb372196.pdf> (accessed on 05.10.2025).
- MeteoModel, 2025, URL: <https://meteomodel.pl/dane/historyczne-dane-pomiarowe/?data=2020-08-04%7B%5C%7Drodzaj=st%7B%5C%7Dimgwid=253220070%7B%5C%7Ddni=60%7B%5C%7Dord=desc>. (accessed on 05.01.2025).
- Pasetto, D.; Arenas-Castro, S.; Bustamante, J.; Casagrandi, R.; Chrysoulakis, N.; Cord, A.F.; Dittrich, A.; Domingo-Marimon, C.; El Serafy, G.; Karnieli, A.; Kordelas, G.A.; Manakos, J.; Mari, L.; Monteiro, A.; Palazzi, E.; Poursanidis, D.; Rinaldo, A.; Terzago, S.; Ziemba, A.; Ziv, G. Integration of satellite remote sensing data in ecosystem modelling at local scales: Practices and trends. *Methods Ecol. Evol.* 2018, 9, pp. 1810–1821. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13018>.
- Pettorelli, N.; Ryan, S.; Mueller, T.; Bunnefeld, N.; Jędrzejewska, B.; Lima, M.; Kausrud, K. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): unforeseen successes in animal ecology. *Climate Research* 2011, pp. 46, 15–27.
- Pettorelli, N.; Laurance, W.F.; O'Brien, T.G.; Wegmann, M.; Nagendra, H.; Turner, W. Satellite remote sensing for applied ecologists. *Journal of Applied Ecology* 2014, 51(4), 839–848. DOI:10.1111/1365-2664.12261.
- PlanetLabs. 2020, Planet imagery product specification. W: Support Planet. URL: <https://support.planet.com/hc/en-us/articles/4405983661213-Overview-of-PlanetScope-Image-Quality-Improvements>.
- Planet, 2021 - Usable Data Masks. URL: <https://developers.planet.com/docs/data/udm-2/>.
- Planet, 2024, <https://www.planet.com/>.
- Rada UE. DYREKTYWA RADY 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory RADA. W: *Journal of the Color Science Association of Japan* 16.1 (1992), s. 79–80. ISSN: 0389-9357.
- Rouse, J.W.; Jr., Haas, R.H.; Schell, J.A.; Deering, D.W. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *Prog. Rep. RSC 1978-1*, Remote Sensing Center, Texas A&M Univ., College Station, nr E73-106393, 93 (NTIS No. E73-106393), 1973.
- Satkiewicz, A. M. (red.), Kronika Biebrzańskiego Parku Narodowego 2024 r., Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza, 2025. ISBN: 978-83-60774-44-1. Available on-line: <https://bbpn.gov.pl/pliki-do-pobrania/pobierz/9b926346-e295-43ed-a912-d2550c2449b4.pdf> (accessed on 05.10.2025).
- Szczygieł, R. Skutki pożarów lasów i działania prewencyjne. Kampania informacyjna pt. „Ogień w lesie a przyroda – podniesienie świadomości mieszkańców terenów wiejskich w zakresie zapobiegania pożarom lasów, 2010; 30 pp. Available online: https://www.ogienwlesie.lasy.gov.pl/c/document_library/get_file?uuid=c832ad07-7597-4f73-9629-

b98a6c4a7fb6&groupId=4436465#:~:text=Bezpo%C5%9Brednim%20skutkiem%20po%C5%BCaru%20jest%20cz%C4%99%C5%9Bciowe,tempie%20obiegu%20materii%20w%20ekosystemie (accessed on 02.06.2024).

Wiatr, E. (red.), Kronika Biebrzańskiego Parku Narodowego 2020 r., Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza, 2021, ISBN: 978-83-60774-31-1. Available online: <https://bbpn.gov.pl/pliki-do-pobrania/otworz/b1b94f00-5097-467f-b44a-d8269caf3d00.pdf>. (accessed on 05.01.2025).

Wiatr, E. (red.), Kronika Biebrzańskiego Parku Narodowego 2021 r., Biebrzański Park Narodowy, Osowiec-Twierdza, 2022. Available online: <https://bbpn.gov.pl/pliki-do-pobrania/pobierz/e9deb92e-7dc2-49e1-a0de-86bc2f2c5f7f.pdf>. (accessed on 05.10.2025).

Joanna Ceranka, Aleksandra Radecka, Katarzyna Osińska-Skotak
Teledetekcja Środowiska
Polskie Towarzystwo Geograficzne
Oddział Teledetekcji i Geoinformatyki – Warszawa 2025