

AGATA HOŚCIŁO, ANETA LEWANDOWSKA

## Zastosowanie danych z satelity Sentinel-2 do szacowania rozmiaru szkód spowodowanych w lasach huraganowym wiatrem w sierpniu 2017 roku

Assessment of forest damage caused by the August 2017 hurricane using Sentinel-2 satellite data

### ABSTRACT

Hościło A., Lewandowska A. 2018. Zastosowanie danych z satelity Sentinel-2 do szacowania rozmiaru szkód spowodowanych w lasach huraganowym wiatrem w sierpniu 2017 roku. Sylwan 162 (8): 619-627.

Extreme weather events such as hurricanes, floods or fires become more and more common phenomena in Europe. In August 2017, strong wind accompanied by heavy thunderstorms caused severe damage over the large area in central and western Poland. According to rapid damage assessment prepared by the State Forests authorities a few days after the windthrow, ca 79.7 thousand hectares of forest was damaged and 9.8 million of cubic meters of wood was lost. Assessment of such a large-scale forest damage is difficult without using the remote sensed data. In this study, we examined the potential of the European satellite Sentinel-2 data for assessment of the forest damage caused by the windthrow. The assessment was performed using a difference between a normalized difference moisture index (NDMI) calculated based on the pre- and post-damage Sentinel-2 images. NDMI was calculated based on NIR (824 nm) and SWIR (1610 nm) bands. The result of this study showed the total damage area in forest is equal to 35.8 thousand hectares, of which 27.7 thousand hectares was damaged within the State Forests and 8.1 thousand hectares outside the State Forests administration. These figures are much lower than the estimates by the State Forests, regarding the forest damage within the State Forests and higher comparing to estimations in the non-state forest. In fact, these figures are comparable with the heavily damage areas assigned to clearance by the State Forests. The accurate comparison of the results was not possible due to the lack of up-to-date information on forest damage. Sentinel-2 data revealed to be perfect data for large scale damage assessment and post-damage forest monitoring mainly due to the wide swath up to 290 km. The limitation of the optical sensors is the cloudiness. Unfortunately, in the case of this analysis, the first cloud free image was acquired 6 weeks after the windthrow. It reduces the potential of the single-source data for rapid assessment of damages.

### KEY WORDS

forest damage, windthrow, remote sensing

### ADDRESSES

Agata Hościło – e-mail: [agata.hoscilo@igik.edu.pl](mailto:agata.hoscilo@igik.edu.pl)  
Aneta Lewandowska

Centrum Teledetekcji, Instytut Geodezji i Kartografii; ul. Jacka Kaczmarskiego 27, 02-679 Warszawa

## Wstęp

Zmiany klimatyczne i ocieplanie się klimatu powodują coraz częstsze występowanie ekstremalnych zjawisk pogodowych typu huragany, powodzie czy pożary. Rok 2017 został nazwany w wielu krajach rokiem ekstremalnych zjawisk pogodowych, klęsk żywiołowych i huraganów, a Narodowa Służba Oceaniczna i Atmosferyczna USA uznała go za najdroższy pod względem wydatków związanych z katastrofami naturalnymi. W 2017 roku w USA zanotowano 16 klęsk żywiołowych (kilka huraganów, gradobicia, pożary, powodzie), które spowodowały zgon 362 osób i straty około 300 miliardów dolarów (<https://www.ncdc.noaa.gov/billions>). Dotychczas huragany i orkany były dość częstym zjawiskiem w wschodnich wybrzeży Ameryki Północnej, np. huragany Irma, Maria i Harvey o prędkości dochodzącej do 300 km/h, szalejące w 2017 roku na Karaibach i wschodnim wybrzeżu USA. Huraganowe wiatry stają się coraz częstszym zjawiskiem również w Europie, dotychczas uznawanej za stosunkowo stabilną. Naukowcy ostrzegają, że wraz z ocieplaniem się klimatu liczba ekstremalnych zjawisk w Europie będzie wzrastała [Haarsma i in. 2013; Forzieri i in. 2016, 2017].

W 2017 roku huraganowe wiatry nie ominęły również Polski. W nocy z 11 na 12 sierpnia 2017 roku nad Polską przeszły gwałtowne burze, którym towarzyszyły porywy wiatrów dochodzące do 115 km/h. Największe straty materialne odnotowano w województwach kujawsko-pomorskim, pomorskim i wielkopolskim (<http://www.pogodynka.pl/wiadomosci/aktualnosci/stanowisko-imgw-pib-ws-sytuacji-meteo-11-12082017-1092>). W wyniku nawałnicy zginęło 6 osób, wiele rodzin pozostało bez dachu nad głową, zniszczeniu uległy tysiące budynków i linie energetyczne. Odnotowano też wielkoobszarowe, silne uszkodzenia lasów. Lasy Państwowe (LP) oszacowały straty w drzewostanie na 9,8 mln m<sup>3</sup> drewna. Według wstępnych szacunków około 79,7 tysięcy ha lasów uległo uszkodzeniu, z czego około 39,2 tysięcy ha lasu będzie wymagało odnowienia [Trębski 2017]. Podane liczby zawierają przybliżone szacunki podane 6 dni po przejściu nawałnicy i odnoszą się one do stanu 18 sierpnia 2017 roku. Szacowanie strat w przypadku wielkoobszarowych zniszczeń jest utrudnione skalą zjawiska oraz często ograniczonym dostępem do zniszczonych obszarów. W przypadku huraganów pomocna w szacowaniu zasięgu i stopnia zniszczeń może okazać się teledetekcja satelitarna. Wysokorozdzielcze zobrazenia satelitarne rejestrowane z wysoką częstotliwością umożliwiają odtworzenie sytuacji przed przejściem i po przejściu nawałnicy, tym samym pozwalając na określenie powierzchni zniszczeń.

Celem opracowania było zbadanie możliwości wykorzystania zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 do określania zasięgu zniszczeń w lasach spowodowanych sierpniowym huraganem. Misja Sentinel-2 to dwa siostrzane satelity: Sentinel-2A (wyniesiony na orbitę w czerwcu 2015 roku) i Sentinel-2B (w marcu 2017 roku), rejestrujące promieniowanie w zakresie optycznym, bliskiej i dalszej podczerwieni. Największe atuty misji Sentinel-2 to skrócony czas rewizyty, szeroki pas obrazowania oraz zwiększona rozdzielczość przestrzenna. Ten sam fragment powierzchni Ziemi rejestrowany jest co 5 dni, a pas obrazowania sięga 290 km. Wielkość piksela Sentinel-2 wynosi 10 m w zakresie widzialnym i bliskiej podczerwieni oraz 20 m w bliższym (tzw. red-edge) i dalszym zakresie podczerwieni. Rejestracja odbywa się łącznie w 13 kanałach spektralnych.

## Materiał i metody

Badaniami objęto obszar 30 nadleśnictw położonych na terenie województw pomorskiego, kujawsko-pomorskiego, wielkopolskiego, łódzkiego i opolskiego. Przybliżony zasięg przestrzenny określono na podstawie mapy obszarów, na których w dniach 11-12.08.2017 roku wystąpiły szkody powyżej 10 tys. m<sup>3</sup> [Trębski 2017].

Do analiz wybrane zostały bezchmurne zobrazowania Sentinel-2 zarejestrowane w terminie możliwie bliskim przed huraganem i po jego przejściu. Czynnikiem decydującym przy wyborze zobrazowań była, oprócz stopnia zachmurzenia, również data rejestracji obrazu. Szczególnie ważnym aspektem przy analizach wieloczasowych jest wybór obrazów z tego samego sezonu wegetacyjnego. Do dalszych analiz wybrano zobrazowania zarejestrowane w sezonie letnim: 30.07.2017 roku i 13.09.2016 roku (odpowiadające sytuacji przed nawałnicą) oraz zobrazowania z 28.09.2017 roku i 24.08.2017 roku (odpowiadające sytuacji po przejściu huraganu). Dla nadleśnictwa Grotniki nie udało się pozyskać odpowiednich zdjęć do czasu rozpoczęcia analizy. Należy pamiętać, że jeden obraz Sentinel-2, mimo iż pokrywa szeroki pas, sięgający 290 km, udostępniany jest w kwadratach zwanych „granulami”, o wymiarach 100×100 km. Na potrzeby tego opracowania pojęcie „zdjęcie” odnosi się do pojedynczej „granuli”. Analizie poddano łącznie 7 par zdjęć z satelity Sentinel-2 zarejestrowanych przed przejściem i po przejściu huraganu, czyli 14 zdjęć. Dane z Sentinel-2 pozyskano z repozytorium ESA Copernicus Open Access Hub.

Mapa cyfrowa przedstawiająca lesistość rzeczywistą kraju powstała w procesie integracji źródłowych danych przestrzennych: Leśnej Mapy Numerycznej (LMN), Bazy Danych Obiektów Topograficznych (BDOT10K), Bazy Danych Systemu Identyfikacji Działek Rolnych (LPIS)-Pola Zagospodarowania (PZ) i LPIS-PROW, warstwy wysokorozdzielczej dla lasów wygenerowanej na podstawie zobrazowań satelitarnych (High Resolution Layer-HRL) oraz danych z Banku Danych o Lasach (BDL). Mapa rzeczywistej lesistości odnosi się do definicji lasu określonej w Ustawie... [1991]. Obejmuje lasy wszystkich form własności oraz obszary z roślinnością leśną niebędące lasami według zapisów ewidencji gruntów i budynków, o zwartej powierzchni 0,1 ha i minimalnej szerokości powyżej 10 m. Szczegóły opracowania mapy rzeczywistej lesistości kraju opisane zostały w artykule Hościło i in. [2016]. Mapa lesistości rzeczywistej posłużyła do oddzielenia terenów leśnych od nieleśnych oraz do określenia zasięgu lasów będących własnością LP.

Analizę zniszczeń drzewostanu przeprowadzono z wykorzystaniem spektralnego wskaźnika roślinnego zwanego znormalizowanym różnicowym wskaźnikiem wilgotności NDMI, obliczonego na podstawie danych Sentinel-2 (S-2) według wzoru:

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

gdzie:

NIR – S-2 kanał 8 = 842 nm,

SWIR – S-2 kanał 11 = 1610 nm.

Wskaźnik spektralny NDMI wykorzystuje krótką podczerwień (SWIR), która jest wrażliwa na zmiany zawartości wody w liściach i zmiany struktury gąbczastej mezofilu, oraz bliską podczerwień (NIR), wrażliwą na zmiany w wewnętrznej strukturze liścia [Ceccato i in. 2001]. Wskaźnik NDMI został uznany przez licznych naukowców za optymalny indeks spektralny stosowany do monitorowania zniszczeń i wylesień w lasach strefy borealnej i umiarkowanej [Jin, Sader 2005; Goodwin i in. 2008; Havasova i in. 2015; Schultz i in. 2016] oraz w lasach tropikalnych [Hayes i in. 2008].

Obliczenie wskaźnika NDMI na podstawie danych Sentinel-2 wymagało przepróbkowania danych rejestrowanych w kanale 11, dostępnych w rozdzielczości przestrzennej 20 m, do rozdzielczości przestrzennej 10 m – odpowiadającej rozdzielczości w kanale 8. Wskaźnik NDMI został obliczony dla każdego zdjęcia poddanego wcześniej korekcji atmosferycznej z wykorzystaniem pakietu ESA Sen2Core. Następnie dla każdej pary zdjęć pokrywających ten sam obszar, zarejestrowanych przed przejściem i po przejściu nawałnicy, obliczono różnice wartości wskaźnika (dNDMI).

Celem opracowania było oszacowanie zdegradowanej powierzchni leśnej, dlatego różnicę wskaźnika NDMI obliczono w masce lesistości rzeczywistej. Przy zastosowaniu podejścia progowania wartości dNDMI zostały rozdzielone na dwie podstawowe klasy zdefiniowane jednym progiem szarości, czyli klasę bez zmian (piksele o pozytywnych wartościach wskaźnika dNDMI) oraz klasę zniszczeń (negatywne wartości dNDMI). Granice wartości progowej dNDMI, odpowiadające zniszczonym drzewostanom, ustalono indywidualnie dla każdej pary zdjęć na podstawie wizualnej interpretacji na tle kompozycji barwnej w barwach nierzeczywistych. Ze względu na zróżnicowanie terminów pozyskania zdjęć przed nawałnicą i po nawałnicy niemożliwe było zastosowanie jednej wartości progowej. Wewnątrz klasy zniszczeń wydzielono dwie klasy: 1 – powierzchni, na których nastąpiło całkowite zniszczenie drzewostanu bądź zniszczony drzewostan został w znacznym stopniu uprzętnięty, oraz 2 – powierzchni częściowo zniszczonych, stanowiących mozaikę uszkodzonego i nieuszkodzonego drzewostanu. Dwie klasy zniszczeń zostały wydzielone na podstawie wizualnej analizy tekstury obrazu oraz dominujących odbić spektralnych. W przypadku klasy 1 dominuje odbicie spektralne od powierzchni gruntu, fragmenty charakteryzują się w miarę jednorodną teksturą. W klasie 2 odbicie spektralne od gruntu miesza się z odbiciem od mniej lub bardziej uszkodzonych stojących drzew, wyraźnie widoczna jest mozaika fragmentów silnie zniszczonych i stojących drzew z zachowanymi koronami. Rycina 1 przedstawia przykład powierzchni całkowicie zniszczonych (klasa 1) oraz powierzchni częściowo zniszczonej (klasa 2) – naniesionych na zdjęcie z Sentinel-2 zarejestrowane ponad miesiąc po przejściu nawałnicy.

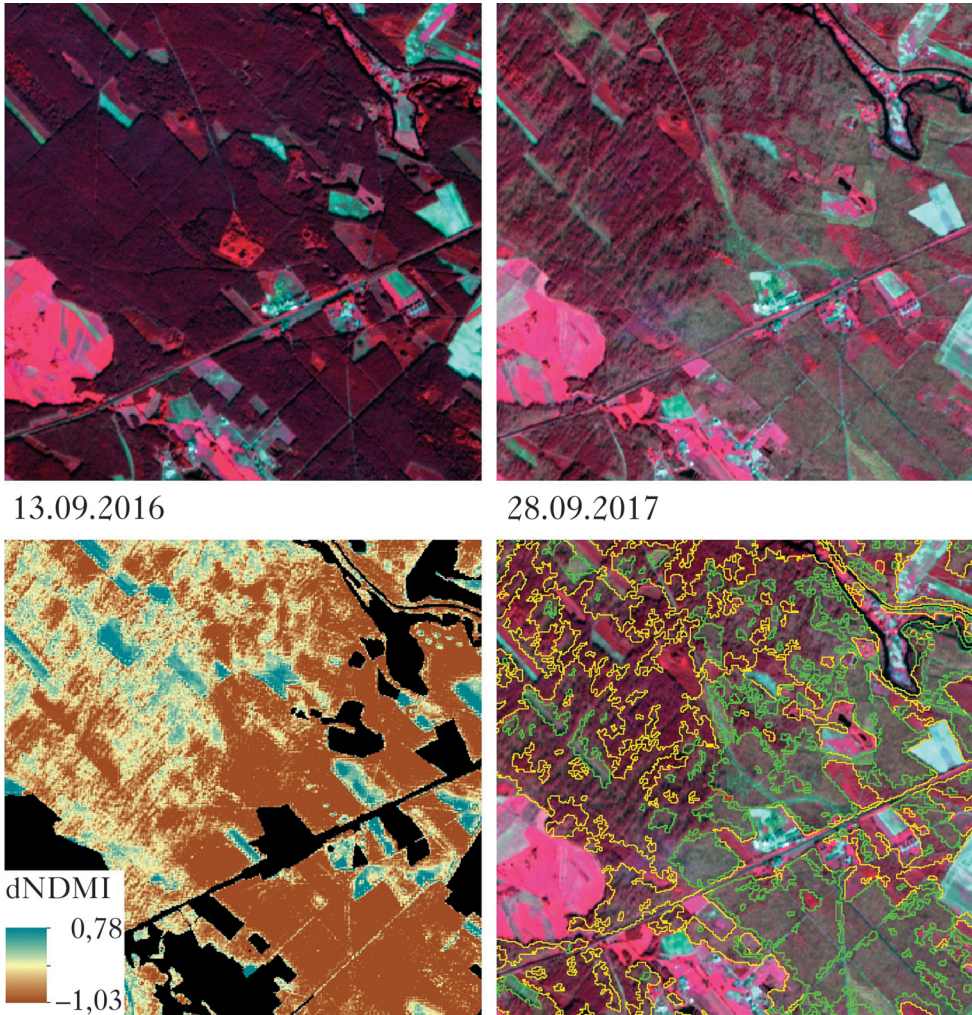
Rezultaty progowania dNDMI podano czyszczeniu poprzez eliminację grupy pikseli poniżej 10 pikseli (0,1 ha). Następnie wyniki dla poszczególnych par zdjęć zostały połączone w spójną całość w celu uzyskania jednolitej, ciągłej warstwy zmian i poddane analizom przestrzennym w programie ArcGIS. Na zakończenie dokonano wizualnej oceny jakości produktu końcowego, wyłączając zmiany niebędące efektem nawałnicy, np. usunięto powierzchnie zrębowe, które powstały w analizowanym okresie (2016-2017). Obliczono sumaryczną powierzchnię szkód w lasach: a) dla poszczególnych nadleśnictw, b) w podziale na klasy zniszczenia oraz c) w podziale na powierzchnie będące własnością LP, należące do Parku Narodowego Bory Tucholskie oraz niebędące własnością LP.

## Wyniki i dyskusja

Według analiz wieloczasowych zobrazowań satelitarnych zarejestrowanych przez europejskiego satelitę Sentinel-2 uszkodzeniu uległy lasy o łącznej powierzchni 35 811 ha, z czego 27 665 ha stanowią uszkodzenia lasów na terenie LP, zaś pozostałe 8146 ha to uszkodzenia w lasach niebędących własnością LP (tab.). Według raportu zakwalifikowano do odnowienia powierzchnię 39 224 ha, czyli o ponad 11 000 ha większą niż powierzchnia zniszczeń w LP określona na podstawie danych satelitarnych. Należy nadmienić, że szacunkowy rozmiar szkód [Stan... 2017] zawiera dane orientacyjne określone w pierwszych dniach po nawałnicy (18 sierpnia 2017).

Największe rozbieżności między powierzchnią zaklasyfikowaną do odnowienia a powierzchnią szkód określoną z satelity są widoczne w nadleśnictwach Lipusz, Ryteł, Czersk, Bytów i Runowo. Największą zgodność między szacunkami DGLP a satelitarnymi wynikami osiągnięto dla nadleśnictw Bydgoszcz, Cewice, Gołębki, Kartuzy, Lubichowo, Kościerzyna, Piaski, Różanna, Strzebielino, Zamrzenica i Żołędowo. W 8 nadleśnictwach powierzchnia szkód oszacowana na podstawie teledetekcji satelitarnej była większa niż powierzchnia do odnowienia według DGLP. W nadleśnictwach Runowo, Przymuszewo i Tuchola powierzchnia uszkodzona według danych satelitarnych była odpowiednio o 941, 340 i 282 ha większa od szacunków DGLP dotyczących powierzchni odnowień. Dodatkowo na zdjęciach satelitarnych zaobserwowano uszkodzenia





Ryc. 1.

Fragment nadleśnictwa Rytel przed nawałnicą (13.09.2016) i po nawałnicy (28.09.2017) w barwach nierzeczywistych (Sentinel-2, kompozycja RGB=8,4,3), rozkład dNDMI oraz obszary silnie zniszczone lub uprzątnięte (poligony z zieloną granicą) i tereny o średnim zniszczeniu drzewostanu (poligony z żółtą granicą)

Fragment of the Rytel Forest District before (13.09.2016) and after (28.09.2017) the windthrow (Sentinel-2 images, band composite 8,4,3), distribution of dNDMI as well as delimitation of heavily damaged or clearance areas (green outline) and moderately damaged areas (yellow outline)

w nadleśnictwach: Lutówka (RDLP Toruń) oraz Oborniki Śląskie, Oleśnica Śląska i Żmigród (RDLP Wrocław), które nie zostały wymienione w raporcie DGLP. Na terenie RDLP Wrocław powierzchnia strat w LP sięgnęła 134 ha.

Nawałnica nie ominęła również lasów niepaństwowych (tab.). Według analiz zobrazowań Sentinel-2 wichura uszkodziła 8146 ha lasów niebędących własnością DGLP, w tym 47 ha lasów należących do Parku Narodowego Bory Tucholskie. Dla porównania: według szacunków DGLP powierzchnia do odnowień w lasach niepaństwowych szacowana jest na około 7000 ha [Drabarczyk 2017].

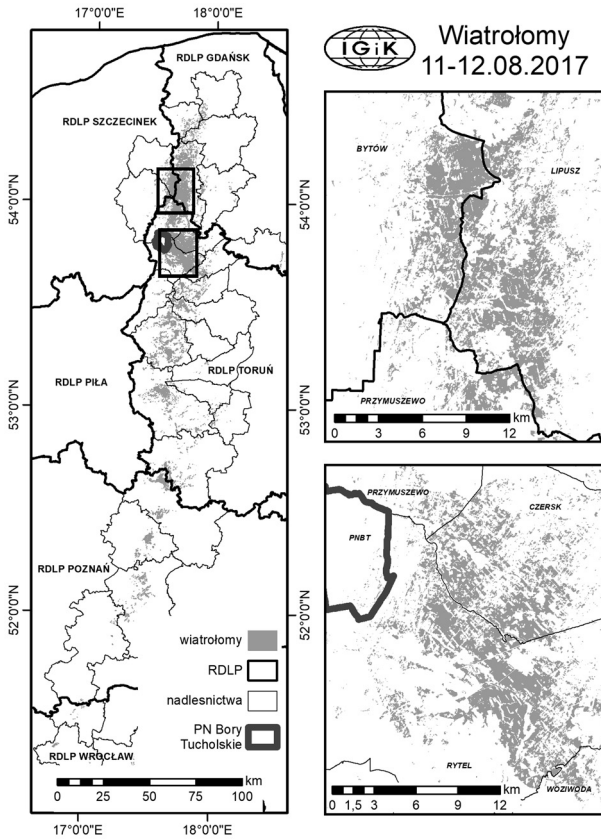
Bardzo ważnym aspektem przy zastosowaniu teledetekcji satelitarnej w szacowaniu rozmiaru szkód w lasach jest termin pozyskania zobrażeń. Ograniczeniem dla satelitów optycznych jest silne zachmurzenie. W przypadku sierpniowego huraganu pierwsze bezchmurne zobrażenia zostały zarejestrowane 28.09.2017 roku, czyli ponad miesiąc po przejściu nawałnicy. Wyjątek stanowiła południowa część obszaru badań, dla której dostępne było zobrażenie z 24.08.2017

Tabela.

Powierzchnia zniszczeń w Lasach Państwowych (LP-Ac [ha]) i powierzchnia do odnowienia (LP-Ado [ha]) według Stan... [2017] oraz powierzchnia zniszczeń ogółem (S2-Ac [ha]), zniszczeń w Lasach Państwowych (S2-ALP [ha]) i poza Lasami Państwowymi (S2-Apoza [ha]) według danych Sentinel-2

Area of disturbed forest in the State Forests (LP-Ac [ha]) and area assigned for clearance (LP-Ado [ha]) according to Stan... [2017] as well as total area of damaged forest (S2-Ac [ha]), forest damage within (S2-ALP [ha]) and outside (S2-Apoza [ha]) the State Forest administration according to Sentinel-2 data

|                    | LP-Ac  | LP-Ado | S2-Ac  | S2-ALP | S2-Apoza |
|--------------------|--------|--------|--------|--------|----------|
| RDLP Toruń         | 47 113 | 22 118 | 21 742 | 16 842 | 4 900    |
| Bydgoszcz          | 950    | 71     | 32     | 19     | 13       |
| Czersk             | 6 000  | 5 100  | 3 294  | 2 765  | 529      |
| Gołębki            | 2 620  | 620    | 747    | 578    | 170      |
| Lutówko            |        |        | 148    | 46     | 102      |
| Przymuszewo        | 2 500  | 1 760  | 3 268  | 2 100  | 1 168    |
| Różanna            | 243    | 43     | 99     | 57     | 43       |
| Runowo             | 5 800  | 2 200  | 3 940  | 3 141  | 799      |
| Rytel              | 14 000 | 8 000  | 5 770  | 5 073  | 697      |
| Solec Kujawski     | 500    | 500    | 69     | 64     | 6        |
| Szubin             | 4 000  | 1 900  | 1 380  | 1 072  | 308      |
| Tuchola            | 3 050  | 300    | 993    | 582    | 411      |
| Woziwoda           | 3 000  | 804    | 633    | 455    | 178      |
| Zamrzenia          | 2 250  | 800    | 1 278  | 877    | 401      |
| Żołędowo           | 2 200  | 20     | 43     | 15     | 28       |
| PN Bory Tucholskie |        |        | 47     |        | 47       |
| RDLP Gdańsk        | 10 044 | 10 044 | 7 977  | 5 371  | 2 606    |
| Cewice             | 165    | 165    | 214    | 151    | 63       |
| Kartuzy            | 55     | 55     | 125    | 53     | 72       |
| Kościerzyna        | 36     | 36     | 130    | 89     | 41       |
| Lipusz             | 9 636  | 9 636  | 7 308  | 4 929  | 2 379    |
| Lubichowo          | 72     | 72     | 72     | 68     | 5        |
| Strzebielino       | 80     | 80     | 129    | 82     | 47       |
| RDLP Poznań        | 15 449 | 3 162  | 3 026  | 2 836  | 191      |
| Czerniejewo        | 2 000  | 350    | 563    | 517    | 46       |
| Gniezno            | 6 199  | 2 500  | 1 837  | 1 724  | 113      |
| Jarocin            | 6 950  | 282    | 564    | 539    | 25       |
| Piaski             | 300    | 30     | 62     | 55     | 6        |
| RDLP Szczecinek    | 7 100  | 3 900  | 2 930  | 2 488  | 442      |
| Bytów              | 3 900  | 3 700  | 2 751  | 2 359  | 393      |
| Osusznica          | 3 200  | 200    | 179    | 129    | 50       |
| RDLP Wrocław       |        |        | 134    | 128    | 6        |
| Oborniki Śl.       |        |        | 92     | 86     | 6        |
| Oleśnica Śl.       |        |        | 14     | 14     | 0        |
| Żmigród            |        |        | 28     | 28     | 1        |
| Razem<br>In total  | 79 706 | 39 224 | 35 811 | 27 665 | 8 146    |



Ryc. 2.

Przestrzenny rozkład powierzchni zniszczonych w lasach (szary) opracowany na podstawie wieloczasowych zobrażeń satelitarnych Sentinel-2. Spatial distribution of forest damages (grey) caused by windthrow derived from the multitemporal Sentinel-2 datasets

roku – niecałe 2 tygodnie po huraganie. Część nadleśnictwa Oborniki Śląskie nie była zachmurzona w obydwu terminach (ryc. 3). Dzięki temu możliwe było porównanie dostępnych zobrażeń pod kątem określania rozmiaru szkód w sytuacjach kryzysowych. Na fragmencie zdjęcia z 28.09.2017 roku obszar zniszczeń jest lepiej widoczny niż na zdjęciu z 24.08.2017 roku. Na zdjęciach z końca września wyraźnie zauważalny jest postęp prac porządkowych. Fragmenty drzewostanu częściowo uszkodzonego (widocznego na zdjęciu z 24.08.2017) zostały uprzątnięte, stąd wyraźny wzrost odbicia spektralnego od pokrywy glebowej (ryc. 3).

Na zdjęciu zarejestrowanym ponad 2 tygodnie po huraganie możliwe jest określenie stopnia zniszczenia drzewostanu. Najbardziej widocznym efektem przejścia huraganu są zniszczone korony drzew, uszkodzone pnie i redukcja aparatu asymilacyjnego drzew [Wesołowski, Żmihorski 2018]. W efekcie zmniejsza się udział aparatu asymilacyjnego w wartościach odbicia spektralnego od drzewostanów. Powierzchnie lasów, na których nastąpiło prawie całkowite zniszczenie drzewostanu, charakteryzują się homogeniczną teksturą o dominacji odbicia spektralnego od pokrywy glebowej (ryc. 1). Dla porównania: na powierzchniach częściowo zniszczonych wciąż widać znaczny udział odbicia spektralnego od roślinności. Huraganowy wiatr, łamiąc i przewracając wysokie drzewa, odsłania niższe piętra lasu, które doznają mniejszych uszkodzeń [Ulanowa 2000; Żmihorski 2010]. Odbicie spektralne rejestrowane przez sensory satelitarne pochodzi zarówno od uszkodzonych drzew, jak i od odsłoniętego niższego piętra lasu. Informacja o proporcji odbicia spektralnego od powierzchni gleby i roślinności mogłaby posłużyć do określenia powierzchni, na których niezbędne jest przeprowadzenie prac porządkujących i odnowień, oraz powierzchni, które mają





24.08.2017

28.09.2017

Ryc. 3.

Zasięg zniszczeń (na żółto) we fragmencie nadleśnictwa Oborniki Śląskie wyznaczony na podstawie zdjęcia Sentinel-2 z 28.09.2017 naniesiony na zdjęcie zarejestrowane dwa tygodnie (24.08.2017) i sześć tygodni (28.09.2017) po nawałnicy

Extent of forest damage in the Oborniki Śląskie Forest District (yellow outline) derived from 28.09.2017 Sentinel-2 image overlaid on the image taken two (24.08.2017) and six (28.09.2017) weeks after windthrow

potencjał do odnowy samoistnej. Badania naukowe potwierdzają pozytywny wpływ naturalnej regeneracji drzewostanu na zachowanie różnorodności biologicznej lasów oraz zwiększenie w przyszłości ich odporności na huragany [Lindenmayer i in. 2008, 2017; Źmihorski 2010; Thorn i in. 2016].

Wyniki analizy powierzchni uszkodzeń w podziale na stopnie zniszczenia pokazały, że ponad 10 000 ha lasu uległo degradacji całkowitej (w tym fragmenty uprzątnięte), zaś 25 700 ha częściowemu zniszczeniu. Otrzymane wyniki należy taktować jako orientacyjne – ze względu na brak danych referencyjnych umożliwiających określenie stopnia zniszczeń. W przypadku drzew częściowo uszkodzonych znaczące zmiany w strukturze ulistnienia i zawartości wody w liściach w porównaniu do nieuszkodzonych drzewostanów będą mogły być określone metodami teledacyjnymi po upływie dłuższego okresu. Ze względu na przyspieszone prace porządkowe (widoczne na zdjęciu z 28.09.2017; ryc. 3) niemożliwe było wykonanie analiz porównawczych określających kondycję drzewostanu w krótkim i dłuższym okresie po przejściu huraganu.

## Podsumowanie

Za pomocą różnicy wskaźnika spektralnego NDMI obliczonego na podstawie danych zarejestrowanych przez satelitę Sentinel-2 możliwe było określenie powierzchni szkód w lasach wyrządzonych przez huraganowy wiatr w sierpniu 2017 roku. Szeroki pas obrazowania satelitów Sentinel-2, sięgający 290 km, umożliwia prowadzenie analiz wielkoobszarowych, co w przypadku szkód wyrządzonych przez nawałnice okazało się niezastąpionym atutem. Analizowany obszar o powierzchni około 500×200 km prawie w całości położony był na obrazach satelitarnych zarejestrowanych w jednym terminie. Ponadto wysoka częstotliwość pozyskania obrazu tego samego fragmentu powierzchni Ziemi (co 5 dni w przypadku Sentinel-2AB) pozwala na monitorowanie stanu lasów po przejściu nawałnicy i ocenę zaawansowania prac porządkowych. Dodatkową zaletą jest 13 ka-



nałów spektralnych, w tym 4 kanały bliskiej podczerwieni (tzw. red-edge) oraz 2 kanały dalszej podczerwieni, które umożliwiają analizę kondycji zdrowotnej drzewostanu. Jedynym ograniczeniem dla satelitów optycznych Sentinel-2 jest silne zachmurzenie. Najwcześniejsze bezchmurne zdjęcie po huraganie udało się pozyskać dla większości obszaru dopiero po 6 tygodniach od przejścia nawałnicy. Uzyskane wyniki powierzchni szkód w lasach według analiz satelitarnych różniły się od szacunków DGLP [Stan... 2017]. Wyniki przeprowadzonych analiz potwierdziły, że wielkość zniszczeń w LP jest mocno niedoszacowana, natomiast w lasach nienależących do LP – przeszacowana. Należy jednak pamiętać, że szacunkowy rozmiar szkód zawiera dane orientacyjne określone w pierwszych dniach po nawałnicy. Wskazane byłoby dokonanie porównania otrzymanych wyników z aktualnymi danymi referencyjnymi, jednak do momentu złożenia artykułu nie były one dostępne.

## Literatura

- Ceccato P., Flasse S., Tarantola S., Jacquemon S., Gregoire J. M. 2001. Detecting vegetation water content using reflectance in the optical domain. *Remote Sensing of Environment* 77: 22-33.
- Drabarezyk J. 2017. Huragan stulecia – dziś i jutro po huraganie. *Głos Lasu* 9 (561): 16-18.
- Forzieri G., Cescatti C., Silva F. B., Feyen L. E. 2017. Increasing risk over time of weather-related hazards to the European population: a data-driven prognostic study. *Lancet Planet Health* 1: e200-e208. DOI: 10.1016/S2542-5196(17)30082-7.
- Forzieri G., Feyen L., Russo S., Voudoukas M., Alfieri L., Outten S., Migliavacca M., Bianchi A., Rojas R., Cid A. 2016. Multi-hazard assessment in Europe under climate change. *Climate Change* 137 (1-2): 105-119. DOI: 10.1007/s10584-016-1661-x.
- Goodwin N. R., Coops N. C., Wulder M. A., Gillanders S., Schroeder T. A., Nelson T. 2008. Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 112 (9): 3680-3689.
- Haarsma R. J., Hazeleger W., Severijns C., de Vries H., Sterl A., Bintanja R., van Oldenborgh G. J., van den Brink H. W. 2013. More hurricanes to hit western Europe due to global warming. *Geophysical Research Letters* 40: 1783-1788. DOI: 10.1002/grl.50360.
- Havasova M., Bucha T., Ferenčík J., Jakuš R. 2015. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of Forest Research* 58 (2): 295-310. DOI: 10.15287/afr.2015.388.
- Hayes D. J., Cohen W. B., Sader S. A., Irwin D. E. 2008. Estimating proportional change in forest cover as a continuous variable from multi-year MODIS data. *Remote Sensing of Environment* 112 (3): 735-749.
- Hościło A., Mironczuk A., Lewandowska A. 2016. Określenie rzeczywistej powierzchni lasów w Polsce na podstawie dostępnych danych przestrzennych. *Sylvan* 160 (8): 627-634.
- Jin S., Sader S. A. 2005. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment* 94 (3): 364-372.
- Lindenmayer D. B., Burton P. J., Franklin J. F. 2008. *Salvage logging and its ecological consequences*. Island Press, Washington, D.C.
- Lindenmayer D. B., Thorn S., Banks S. 2017. Please do not disturb ecosystems further. *Nature Ecology & Evolution* 1: 0031.
- Schultz M., Clevers J. G. P. W., Carter S., Verbesselt J., Avitabile W., Quang H. V., Herold M. 2016. Performance of vegetation indices from Landsat time series in deforestation monitoring. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 52: 318-327. DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.020.
- Stan siły wyższej o zasięgu ponadlokalnym w Państwowym Gospodarstwie Leśnym Lasy Państwowe zaistniały w dniach 11 i 12 sierpnia 2017 r. 2017. *Biuletyn Informacyjny Lasów Państwowych*.
- Thorn S., Bässler C., Svoboda M., Müller J. 2016. Effects of natural disturbances and salvage logging on biodiversity – Lessons from the Bohemian Forest. *Forest Ecology and Management* 388: 113-119.
- Trębski K. 2017. Największy kataklizm w historii Lasów Państwowych. <https://www.lasy.gov.pl/pl/informacje/aktualnosci/najwieksza-taka-kleska-w-historii-polskich-lasow>
- Ulanowa G. 2000. The effects of windthrow on forest at different spatial scales: a review. *Forest Ecology and Management* 135: 155-167.
- Ustawa o lasach z dnia 28 września 1991 r. 1991. Dz. U. nr 101, poz. 444 z późn. zm.
- Wesołowski T., Żmihorski M. 2018. Lasy po huraganie: uczymy się na błędach. [www.foretbiology.org](http://www.foretbiology.org) 1: 1-7.
- Żmihorski M. 2010. The effect of windthrow and its management on breeding bird communities in a managed forest. *Biodiversity & Conservation* 19: 1871-1882.