

MAPPING OF WINDSTORM DAMAGE OCCURRING IN THE FOREST STANDS OF CZERNIEJEWO FOREST DISTRICT (POLISH STATE FORESTS NATIONAL HOLDING) USING AERIAL PHOTOGRAPHS AND SENTINEL-2 SATELLITE IMAGERY

Wojciech Krawczyk, Piotr Wężyk

Department of Forest Resources Management, Faculty of Forestry,
University of Agriculture in Cracow

KEY WORDS: hurricane, forest stands damage assessment, aerial orthophoto, Sentinel-2 (ESA)

ABSTRACT: On the night of 11 and 12.08.2017 a severe hurricane passed over Poland, in a belt of almost 300 km, causing damage in forest stands of area exceeding 100 000 ha. The study aimed to demonstrate the implementation of remote sensing technologies in the process of determining the extent of forest stand damages in the Czerniejewo Forest District (RDLP Poznań) caused by wind and monitoring the progress of clean-up work. In this study were used digital aerial orthophotos commissioned by the State Forests National Forest Holding (PGL LP) and Sentinel-2 (ESA) satellite images as well. The area of damaged stands was determined with the use of two approaches, i.e.: supervised classification (approach A) and thresholding of values of Normalised Difference Vegetation Index – NDVI (approach B). The obtained results were compared to reference data obtained by visual interpretation of high resolution RGB aerial orthophotos by RDLP Poznań experts. Monitoring of the progress of the clean-up works in damaged stands was carried out in 9-time intervals. The conducted image classification and spatial GIS analyses showed that the area of stands damaged by the wind was for methods A and B: 579.16 ha and 516.01 ha, respectively, with 631.00 ha as the reference. The results obtained in the study indicate errors in underestimating the area of forest stand damage based on Sentinel-2, i.e.: 51.84 ha (8.2%) in the case of method A and by 114.99 ha (18.2%) for method B. In the whole analysed time, clean-up operations were carried out on the total area of 762.33 ha of damaged forest stands, and their highest intensity was observed in the first 4 months after the storm. The work showed the applicability of free of charge Sentinel-2 (ESA) satellite imagery in the process of determining the extent of forest stand damages, pointing to the supervised classification method (Maximum Likelihood algorithm; ML) as more accurate than using the threshold of NDVI.

1. INTRODUCTION

Strong, gusty winds, commonly referred to as hurricanes or tempests, are one of the main natural factors threatening forest stands (Weindl, 2006). They harm many aspects of forest management, directly damaging forest stands (windthrows and windfalls), decreasing their timber production potential, but also contributing to abrupt changes in forest management plans, disturbing cartographic materials and most importantly changing

financial outcomes of forest administering entities ([Filipek, 2008](#); [Gardiner et al., 2010](#)). A very important indirect effect of wind damage to forests is their exposure to the occurrence of several biotic (insects or fungi) and abiotic factors (microclimate change due to disturbed spatial structure of the forest). Large concentrations of dead wood located on damaged areas significantly increase risk of fires, as well as occurrence of timber-depreciating insects ([SFA, 2006](#); [Thorn et al. 2016](#)).

In the last six decades, windstorms inflicted damage in forests across Europe, contributing to over 50% of all losses in these ecosystems. Most notable windstorms which damaged European forest stands are Lothar (26.12.1999), Gudrun (08.01.2005), Kyrill (18.01.2007), Klaus (24.01.2009), Xynthia (28.02.2010) or Vaia (28.10.2018; [Forzieri et al. 2020](#)). Polish forests were also affected by violent winds, e.g. the Puszcza Piska (04.07.2002; [Wężyk, 2006](#)).

Forest damage analysed in this paper was a consequence of a heavy thunderstorm that happened on the night of 11/12 August 2017. On 11 August 2017 over southwestern and central Poland a mesoscale frontal system started to form, with thunder cells and supercells, which later formed a squall line. Moving northward, the system shaped into a bow echo – a vertical arched curve, which is extremely dangerous due to accompanying strong, turbulent winds (<https://lowcyburz.pl>). During the storm wind speed exceeded 100 km/h, locally reaching even 150 km/h. The “Windstorm of the century” as it was later named, damaged 100 532 ha of forest stands in 25 Forest Districts of 4 Regional Directorates of Polish State Forests (RDLP), timber loss was estimated to amount to 8.6 million m³ (www.lasy.gov.pl). The overall area of damaged forest stands projected to complex renovation was 29 000 ha. The clean-up of damaged stands was scheduled for mid-2019, and the completion date for the restoration of post-disaster areas was scheduled for as late as 2023 (www.lasy.gov.pl). The removal of losses inflicted by the windstorm cost Polish State Forests 712 mil PLN (as of 09.08.2019, www.lasy.gov.pl). The effective organization of work on the management of the consequences of such a disaster, covering such vast areas, is possible only with the use of modern geoinformation technologies, which primarily include satellite (optical and microwave) or airborne imaging ([Hościło, Lewandowska, 2018](#); [Kurzawiński, 2019](#); [Wężyk et al. 2019](#)).

The study aimed to demonstrate the possible implementation of multispectral satellite imageries from Sentinel-2 mission (ESA; European Space Agency) to decision process in case of natural disaster occurrence, which would facilitate the workflow of expert teams assessing extent and severity of the damage inflicted by the windstorm on 11/12 August 2017 in Czarniejewo Forest District (RDLP Poznań) and to monitor the progress of the removal of windfalls and windthrows, for the establishment of new forest plantation. The paper was also intended to be a demonstration of the practical use of Sentinel-2 (ESA) satellite data in crises and management of their effects.

2. STUDY AREA

The analyses were performed for Czarniejewo Forest District, which belongs to the Regional Directorate of Polish State Forests in Poznań (RDLP). Forest boundaries are situated inside Poznański, Średzki, Wrześnieński and Gnieźnieński districts. The forest stands in Czarniejewo district covers 13 747 ha and administrative boundaries are 91 000 ha, which means that forest cover in the Czarniejewo Forest District is only 15%.

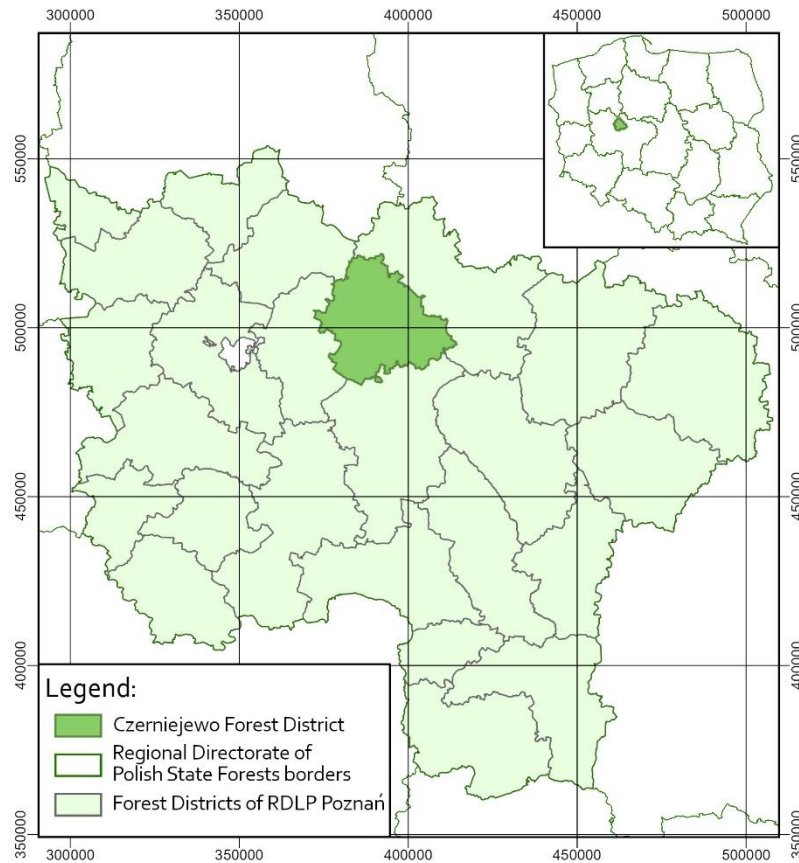


Fig. 1. The map of the extent of Czerniejewo Forest District (RDLP Poznań; spatial reference: PL-1992; sources: Forest Data Bank).

Rys. 1. Mapa zasięgu Nadleśnictwa Czerniejewo (RDLP Poznań; układ współrzędnych PL-1992; źródło: Bank Danych o Lasach).

The Czerniejewo Forest District habitats are rather rich, with deciduous forest habitats composing over 80% of the afforested area. Tree species composition is dominated by scots pine *Pinus sylvestris* L. (59.6%), other species with significant share are: common oak *Quercus robur* L., black alder *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., common birch *Betula pendula* Roth and common ash *Fraxinus excelsior* L.

3. METHODS AND WORKFLOW

Shortly after the windstorm, RDLP Poznań commissioned photogrammetric flights and delivery of aerial RGB orthophotos. With the use of a photointerpretation key, an expert team from RDLP Poznań defined the ranges for each class of wind damage to stands. Compartments with damage covering under 30% of the total area were assigned to “class

30”, compartments with damage covering between 30 and 50% of their total area were assigned to “class 50” and compartments with damage covering more than half of their total area were assigned to “class 100”. Results of interpretation of this aerial orthophoto of August 2017 were provided to authors in the form of ESRI Shapefiles and were used as reference data for damage coverage. The sequence of clean-up works in damaged forest stands was also analysed. A year after the windstorm, RDLP Poznań commissioned another set of aerial orthophotos, which was also shared with authors of this research. Two sets of RGB orthophotos (GSD 0.15 m) were used, developed from aerial imagery captured in August 2017 and August 2018, together with time series of multispectral satellite imageries from the Sentinel-2 (ESA) mission. Sentinel-2 is a constellation of two twin satellites (S-2A and S-2B) orbiting the Earth, operated by the European Space Agency under the Copernicus program. Sentinel-2 (ESA) satellites are equipped with MultiSpectral Instrument (MSI), which allows the recording of a 290 km scene (made available as so-called 100 km granules), in 13 spectral bands with different spatial resolutions (bands: B2, B3, B4, B8 – GSD 10 m; bands: B5, B6, B7, B8A, B11, B12 – GSD 20 m; bands: B1, B9, B10 – GSD 60 m). The radiometric resolution of Sentinel-2 data is 12 bits and the temporal one (revisit period of the two satellites) is about 5 days. Sentinel-2 images were acquired from the Copernicus Access Hub service as the L2A product (after atmospheric correction). The assessment of the area damaged by the windstorm was performed using S-2 satellite imaging recorded on the 28th of September 2017, 48 days after the disaster (due to earlier cloudy weather conditions). The extent of S-2 images was limited by a vector layer of forest divisions from the Forest Numerical Map of the Czarniejewo Forest District (source: Forest Data Bank).

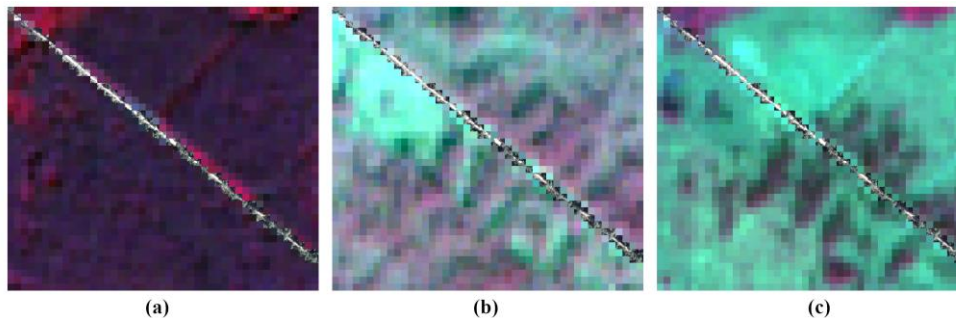


Fig. 2. Comparison of Sentinel-2 CIR composition (843) in Czarniejewo Forest District: (a) – before the windstorm (30.07.2017); (b) - after the windstorm (28.09.2018); (c) after the removal of windthrows and windfalls (06.05.2019)

Rys. 2. Porównanie fragmentu Nadleśnictwa Czarniejewo na zobrazowaniu S-2 (ESA): (a) - przed huraganem (30.07.2017); (b) - po huraganie (28.09.2018); (c) po uprzątnięciu zniszczonych drzewostanów (06.05.2019)

In the next step, the supervised classification in ArcGIS Pro (Esri) environment was performed, with the use of the Maximum Likelihood algorithm (approach A). Four spectral bands of Sentinel-2 imagery characterized by 10 m spatial resolution (GSD) were applied in that classification: B2 (Blue), B3 (Green), B4 (Red), and B8 (NIR). In the study authors defined only 2 classes of forest stands: “DAMAGED” (*Value=1*), involving forest stands damaged by the windstorm (regardless of the severity of the damage, reference classes 30-100%) and “NOT DAMAGED” (*Value=2*) containing forest stands not damaged by the

windstorm. Training areas (AOI) were located in areas with homogenous pixel values. For the class “DAMAGED” 72 AOI’s were created, with the average area of 0.56 ha and for the class “NOT DAMAGED” 59 AOI were created with an average area of 0.91 ha. The classified S-2 imagery was filtered for isolated pixels belonging to the "DAMAGED" class to generalize the results. Using *Region Group* tool isolated pixels of this class were extracted, and then assigned with value of class “NOT DAMAGED” using *Nibble* and *Set Null* tools.

The second approach (approach B) of estimating area of forest stands damaged by the windstorm was thresholding the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI). Two spectral bands of Sentinel-2 imagery characterized by 10 m spatial resolution (GSD) were used: B4 (Red) and B8 (NIR). The key aspect of the accurate division of two defined classes was finding the appropriate threshold value of the index. Based on photointerpretation of Sentinel-2 satellite imageries in CIR composition (Bands 8, 4, 3) and the aerial RGB orthophoto, the NDVI threshold value was defined as 0.72. Pixels with values smaller than the threshold were assigned to the “DAMAGED” class, and pixels with the values larger than the threshold were assigned to the “NOT DAMAGED” class.

To track the process of clearing forest stands damaged by the windstorm, a series of 8 Sentinel-2 scenes was used (acquisition dates: 25.02.2018, 06.04.2018, 06.05.2018, 05.07.2018, 04.08.2018, 13.10.2018, 27.03.2019 and 24.08.2019), as well as maps from the so-called settlement of works performed in Czerniejewo Forest District, representing the status as of 30.12.2017 and 30.12.2018. Based on this data, 9 control periods were established (Table 1). The analysis of monitoring of works within the framework of the preparation of damaged stands for restoration started with vectorization of compartments cleaned up by 30.12.2017 (based on the data made available by RDLP Poznań). Using processed multispectral satellite imageries (CIR and RGB compositions, scenes classified with the use of supervised classification and NDVI thresholding), for consecutive dates of recording S-2 images and available aerial orthophotos, the areas of stands cleaned up in particular periods were vectorized (Table 1).

Table 1. Control periods for monitoring the progress of clean-up work in Czerniejewo Forest District.
Tabela 1. Okresy kontrolne monitorowania postępu prac uprzętających w Nadleśnictwie Czerniejewo.

ID	Analysed time period (from – to)
1	12.08.2017 – 30.12.2017
2	31.12.2017 – 25.02.2018
3	26.02.2018 – 06.04.2018
4	07.04.2018 – 06.05.2018
5	07.05.2018 – 05.07.2018
6	06.07.2018 – 04.08.2018
7	05.08.2018 – 13.10.2018
8	14.10.2018 – 27.03.2019
9	28.03.2019 – 24.08.2019

4. RESULTS

Damaged forest stands area in the Czarniejewo Forest District (RDLP Poznań) defined with the Maximum Likelihood supervised classification (approach A) of Sentinel-2 scene (28.09.2017) amounted to 579.16 ha. The classification accuracy assessment was performed using the confusion matrix and the Cohen's Kappa coefficient. The Producer's accuracy for the class "DAMAGED" was 0.96 and for the "NOT DAMAGED" class was 0.89. User's accuracy value amounted to 0.88 and 0.96 for mentioned classes respectively. The Overall accuracy of classification value was 0.92 and the Cohen's Kappa coefficient was 0.84, which means high compliance of classified damaged forest stands area with reference data ([Landis, Koch, 1977](#)).

Thresholding of the NDVI value (approach B) resulted in 516.01 ha assessed as damaged forest stands. Reference data from an interpretation of aerial RGB orthophotos described 631 ha as forests damaged by the windstorm. The underestimation error value for approaches A and B based on Sentinel-2 (ESA) imageries was 51.48 ha and 114.99 ha respectively. The relative error for performer approaches amounted to 8.2% and 18.2% respectively.

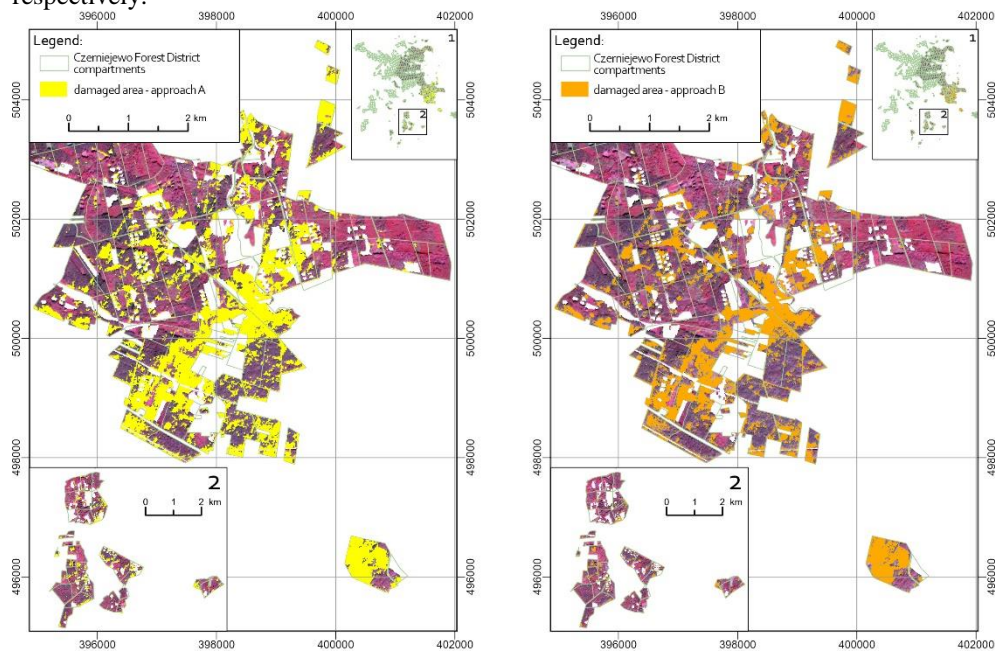


Fig. 3. The map of forest stands damaged by the windstorm: left side – approach A, supervised classification, right side – approach B, thresholding of the NDVI value

Rys. 3. Mapa uszkodzonych przez nawałnicę drzewostanów: z lewej - metoda A klasyfikacji nadzorowanej; z prawej: progowanie wartości wskaźnika NDVI.

The total area of cleared damaged forest stands in Czarniejewo Forest District, in the whole analyzed period (743 days) was 762.33 ha. The dynamics of cleaning-up works in the post-disaster area is presented in Table 2 and on the map (Fig. 5). The largest number of damaged stands was cleaned up during period no. 1 (Table 2), which took the first 140 days

(12.08.2017-30.12.2017) after the windstorm. The area size and intensity (the area cleaned per calendar day in the control period) of the areas cleaned was highest in the first half of the year immediately after the disaster, with the culmination of work intensity in the third period when 2.12 ha were cleaned per day. As time passed, the intensity of work decreased, but a noticeable increase was observed in period 7 (Table 2).

Table 2. The compilation of the area size of clean-up works of damaged stands in each control period using approach A (ML classification).

Tabela 2. Zestawienie rozmiaru powierzchniowego prac uprzętających zniszczonych drzewostanów w poszczególnych okresach kontrolnych. Metodą A (ML).

Period ID	Total cleared area [ha]	Percentage of total cleared area [%]	Intensity of clearing works [ha/day]	Cleared area classified as damaged forest stand [ha]	Percentage of total cleared area [%]
1	257.19	33.74	1.84	171.92	29.68
2	113.19	14.85	1.95	66.71	11.52
3	84.93	11.14	2.12	29.37	5.07
4	45.44	5.96	1.51	23.63	4.08
5	50.25	6.59	0.84	23.80	4.11
6	21.32	2.80	0.71	13.13	2.27
7	102.77	13.48	1.47	56.98	9.84
8	75.27	9.87	0.46	39.23	6.77
9	11.97	1.57	0.08	5.31	0.92
Sum	762.33	100.00	Mean: 1.03	430.08	74.26

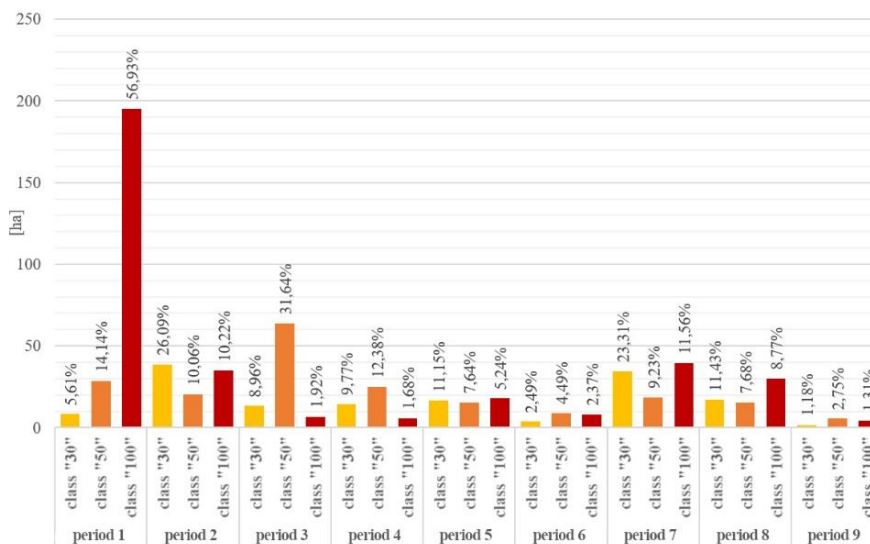


Fig. 4. The cleared forest sub-compartment areas in 9 analysed periods (classes defined in reference data from RDLP Poznań)

Rys. 4. Powierzchnie uprzętających fragmentów pododdziałów w 9 analizowanych okresach (klasy uszkodzeń wg RDLP Poznań)

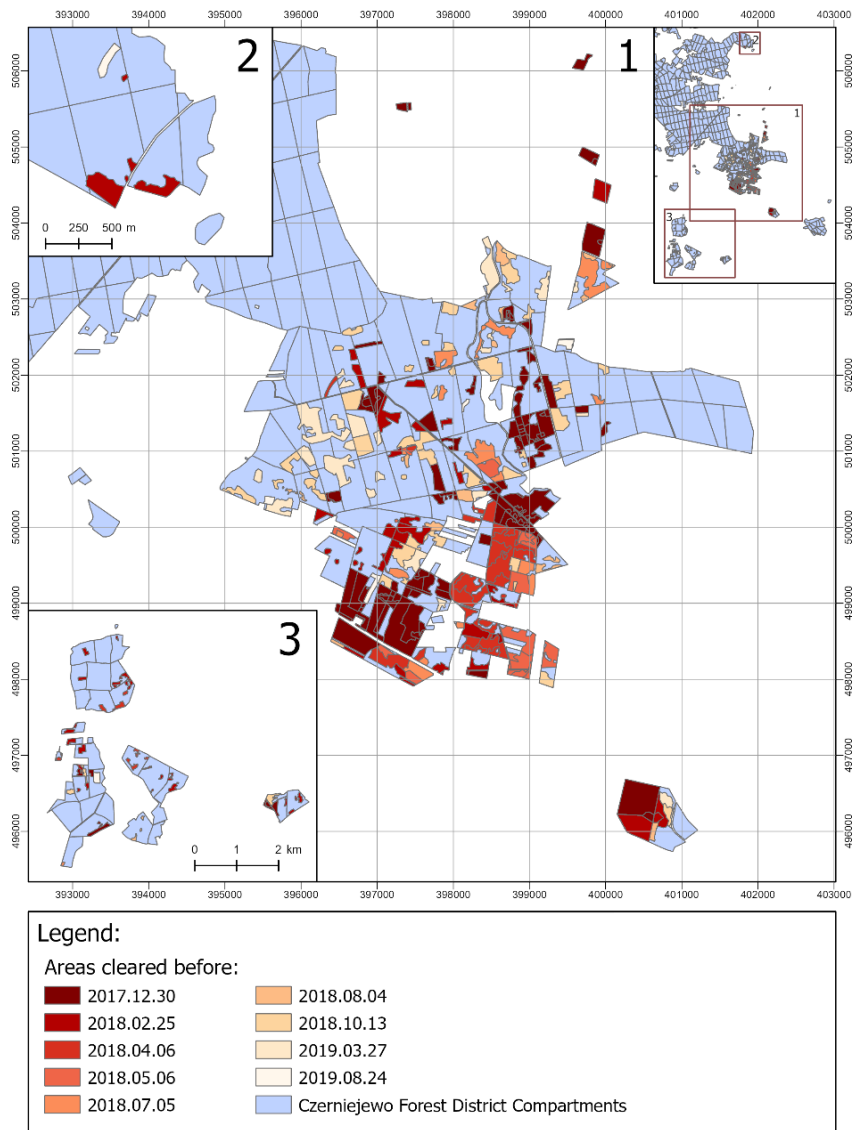


Fig. 5. The map of damaged forest stands with their clearing progress tracked
 Rys. 5. Mapa powierzchni zniszczonych drzewostanów i postęp ich usuwania w czasie

Relating the data concerning the cleaned up areas to the surface extent of the damage determined in the work with the use of the supervised classification method (Table 2), almost 430 ha of damaged stands were cleaned up in the whole analyzed period, which is almost 70% of the area classified as "DAMAGED" on the basis of S-2 satellite images. With the use of Sentinel-2 data a map of clean-up progress on the damaged terrain was created (Fig. 5).

The analysis of the cleaned compartments compared with windstorm damage severity classes defined by the RDLP Poznań expert team (Fig. 4) proved that compartments classified as completely damaged (“class 100”) were cleared first. In the first control period (12.08.2017 – 30.12.2017; Table 1) a total of 195.23 ha of forest stands classified as „class 100” was cleared, which constituted nearly 60% of the area of that class. The authors were not able to determine a particular schema of clean-up works, worth noting is only the low share of “class 100” in all control periods, except for the first one (Fig. 4), which could indicate that clean-up works started from completely damaged forest stands, but with preserved road infrastructure allowing heavy equipment (harvesters) access to these areas.

5. DISCUSSION

The area of forest stands damaged by the windstorm on 11/12.08.2017 in Czerniejewo Forest District (RDLP Poznań) assessed with approach A (supervised ML classification) based on multispectral (B2, B3, B4, and B8; GSD 10 m) Sentinel-2 (ESA) satellite imagery proved to be underestimated by about 8% compared to the reference data (photointerpretation works). It was however 10% more accurate than approach B (thresholding of the NDVI value based on B4 and B8 of S-2 image).

Results of the supervised ML classification based on an appropriate number of training areas can be described as satisfactory. More significant errors that occurred in thresholding of the NDVI value my result from diverse herbaceous and understorey vegetation layers growing in forests of the Czerniejewo Forest District. Damage (e.g. trunk breakage) or removal of the upper layer of the stand can lead to exposure of herbaceous and understorey layers which can have relatively high NDVI values. Without the information on changes in stand height (e.g., from ALS LiDAR or image matching) the performed analysis based only on the normalization value of 2 spectral bands appears to be fast, but it is subject to the risk of error.

Similar temporal analysis can be performed using the algorithm developed by a group of researchers from Maryland University and NASA ([Hansen et al. 2013](#)). Using rich archives of Landsat satellite imagery (NASA) and the Google Earth Engine (GEE), the application, with slight modifications to a publicly available script ([Weżyk, 2020a](#)), provides the possibility to determine forest area loss over a given time period (2000-2018) on a global scale. For Czerniejewo Forest District in the year of windstorm occurrence (2017), by means of the GEE application, the loss of forest area was determined at the level of 540 ha, which is a similar value to the results obtained by the authors of this paper. It should be remembered that the field resolution of Landsat-8 LDCM imagery (NASA) is only 30 m GSD.

Very similar results of the estimated area of forest stands damaged by the windstorm in Czerniejewo Forest District were obtained by [Hościło and Lewandowska \(2018\)](#), using the same Sentinel-2 (ESA) scene, but different remote sensing index. The authors of that paper used Normalized Differential Water Index ($NDWI=(NIR-SWIR)/(NIR+SWIR)$), which is based on NIR (B8) and SWIR (B11) bands. In the case of using SWIR channels with a GSD of 20 m, the reader may be a little surprised by the very small difference in results (0.9 ha) compared to the results of image classification with a GSD of 10 m (approach A). Challenges of forest stands damage classification arise from vast variations of damage. Even though trees might have been broken by the wind, they still have functioning root systems and their foliage remains alive for some time. In the case of completely broken trunks and tree crowns situation

is easier especially after longer periods when physiological death of cells building foliage occurs. Used in this paper Sentinel-2 scene acquired 48 days after the windstorm might be beneficial for forest damage assessment, due to detection of already happening physiological changes in crowns of broken trees.

It is worth noting here the first implementation in Poland of remote sensing images derived from a cloud of PlanetScope Dove (Planet Labs; 4 spectral bands; GSD 3.0 m) nanosatellites constellation in the assessment of windstorm forest damage. Based on the automatic image analysis (GEOBIA method) and analysis of many variables (vegetation indices, values of spectral channels before and after the storm), as well as machine learning, prediction of the extent of particular damage classes of pine stands (4 classes; every 25%) was made with a small error (RMSE 7.1%; ME 1.9%; R2 0.82) for the forest division level. Results of this GEOBIA analysis proved that the immediate use of satellite imagery in situations of natural disasters only a few days after the windstorm is possible. In the same paper ([Weżyk et al. 2019](#)) authors used a high resolution Kompsat-3 satellite image (4 spectral bands; PAN 0.7 m GSD; MS 2.8 m GSD) acquired on 31.07.2017. Despite almost 4 times better spatial resolution than PlanetScope Dove images and 2 weeks later acquisition date (physiological changes began to occur in crowns of damaged trees), classification results turned out to be almost identical (RMSE 8%, ME 3.2%, R2 0.81) for damage class prediction at the forest division level. It is important to point out that in the GEOBIA analysis Image Point Clouds were used, which were generated by matching of aerial photos acquired in September 2017 (25 cm GSD, Metashape Agisoft, SfM) and ALS LiDAR data from 2012 to create Canopy Height Model (CHM) before and after the windstorm ([Weżyk, 2020a](#)). Literature knows also the use of IKONOS-2 (PAN GSD < 1 m) satellite imagery in assessment of forest damage caused by windstorms in boreal forests. Using IKONOS-2 imagery (SpaceImaging/DigitalGlobe), [Rich \(2010\)](#) obtained a correlation (R2=0.65, p<0.0001) with reference data on the extent of damage.

Still, as the practice shows, a proven alternative to satellite imaging is the use of traditional photogrammetric flights ([Boncol, Weżyk, 2012](#)) conducted from aeroplanes with the use of large- and mid-frame cameras. It is however a relatively costly, time-consuming and logistically complicated operation due to large-area damage and limited availability of contractors (e.g. busy performing large-scale photo aerial campaigns). Sometimes high spatial resolution (GSD) reaching several centimetres is a deciding factor of photogrammetric flight commission. The decisive factor for success are anyway the meteorological conditions, which are sometimes more favourable to photogrammetric companies and sometimes to satellite providers (no need for possible permits or certificates). The use of low-altitude platforms, that is Unmanned Aerial Vehicles (UAV) is also possible, however for Polish State Forests their use is limited to flights covering several hectares, due to the use of multicopter instead of fixed-wing platforms for such surveys. UAV offers a wide potential of acquiring high resolution, sub-decimetre imagery, multi- or hyperspectral cameras, or even the application of laser scanning technology (ULS – Unmanned Laser Scanning), however on a limited area. Satellite imagery (in the case of commercial satellites) has a much lower cost per unit stand area compared to aerial imagery, often offering higher spectral resolution but lower spatial resolution. MAXAR currently offers satellite images appropriately enhanced by processing with a 15 cm GSD PAN channel.

For surveying forest stands damaged by windstorms very helpful are 3D datasets created e.g. from interpretation of stereo aerial photos or generated point clouds with methods

of stereo-matching aerial photos. Point clouds from airborne laser scanning, combined with data from aerial photos have indisputably the most accuracy, however, they are also the most expensive datasets. Worth using as reference samples are ALS datasets acquired during nationwide project ISOK (GUGiK). Microwave imagery (e.g. from Sentinel-1 mission), which can be acquired regardless of meteorological conditions, is another part of remote sensing data that can be used to detect changes in vertical structure of forest stands caused by windstorms. Their analysis is more complex than optical data, but the range of image providers continues to expand with new technological solutions with SAR (Synthetic Aperture Radar) systems, such as ICEYE or Capella Space ([Weżyk, 2020b](#)). The area of forest stands damaged by windstorm might be the base for further analysis and GIS studies. With the addition of data included in SILP (Informatics' System of Polish State Forests), it is possible to compute financial losses based on the growing stock of damaged forest stands ([Ciesielski, 2016](#)).

The sequence of clearing forest stands damaged by windstorms is connected with severity and type of damage, timber value, potential timber customers or increasing risk of forest fires, dependent on species composition, habitat and accumulated biomass. Not without importance is the existing road infrastructure or possibilities of storing raw material. In the case of the analysed Czerniejewo Forest District, the fastest clean-up took place in the compartments characterised by total damage to tree stands. Such areas are extremely hard and dangerous to manage, due to a large concentration of timber, high density of broken and fallen trees, the crossing of which makes the work even more difficult ([Suwała, 2000](#); [Puchniarski, 2003](#)). Harvesting timber from areas damaged by windstorms is more time-consuming and less productive than from healthy forests ([Kärhä et al. 2018](#)). The use of machine harvesting technology, which is particularly attractive due to the safety of the machine operator, as well as the good efficiency of the technology, which allows rapid removal of timber accumulated on the damaged area, was a great help ([Stempski, Jabłoński, 2015](#)). The intensity of clean-up works in damaged stands during the whole study period was about 1 ha per day. These actions (the highest intensity and the largest area of cleared sections in the first six months after the storm) are in line with the recommendations of the European Forestry Institute ([Gardiner et al. 2013](#)), to remove accumulated timber as quickly as possible to avoid timber depreciation and minimize the risk of insect gradations and forest fires. However, the rapid harvesting of timber from damaged stands often triggers an economic problem, i.e. a decrease in raw material prices on the market due to its high supply and a simultaneous increase in the cost of harvesting and skidding ([Suwała, 2004](#)).

6. CONCLUSIONS

The assessment of forest stands damage caused by windstorms with the use of satellite imagery is becoming increasingly competitive with traditional methods using field surveys, aircrafts or helicopter flights, or proven photogrammetric workflows (photos acquisition and orthophoto interpretation). Eliminating the labour-intensive and subjective error-prone stages of photointerpretation, semi-automatic processing of satellite imagery appears to be a fast, reliable, and cost-attractive (even in terms of commercial VHRS data) solution. With constantly increasing temporal (constellations of hundreds of satellites), spectral (announced hyperspectral sensors), spatial (decimetre GSD) and radiometric resolutions, the potential use

of satellite data in surveys of damage caused by windstorms in forest stands are enormous and the accuracy of obtained results seems to be satisfactory.

In the case of large-area disturbances information about the vertical structure of forest stands registered with satellite-based laser scanning (e.g. GEDI or ICESat-2 NASA; SLS – Satellite Laser Scanning) will become very useful. However, an important limitation of the use of free of charge satellite images of the Sentinel-2 mission (ESA), in our climatic zone, are often unfavourable weather conditions. Due to the optical sensor (MSI), analyses of Sentinel-2 (ESA) images are performed only on images acquired during cloudless periods. The use of other geodata e.g. aerial orthophotos, ALS point clouds (e.g. ISOK or matching stereo-photos), significantly facilitates the classification of satellite imagery.

Using Sentinel-2 (ESA) supervised spectral channel classification from the VIS-NIR range and NDVI index thresholding, it was possible to demonstrate the process of determining the area of storm damage to stands in the study area. Free of charge Sentinel mission imagery and open source processing software (e.g. SNAP or Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS, GNU General Public License) means that such analysis can be performed on a large scale in Forest Districts or other entities of Polish State Forests. Increasingly frequent extreme weather events in our climatic zone are associated with an increased risk of large-scale stand damage.

The authors emphasize that there is an urgent need to develop strategies for crises inside Polish State Forests, describing activities necessary for the effective management of such situations. The procedure for estimating the surface of the affected area should be based on the processing of imagery on remote platforms, fed by up-to-date satellite imagery from missions with different revisit periods, such as PlanetScope Dove or SkySat (Planet Labs), Sentinel-2 (ESA) or even Landsat-8 (NASA) and microwave data such as Sentinel-1 (ESA), ICEYE or Capella Space, allowing them to be analysed and processed using user-developed and experimentally verified scripts. Such a solution allows for a far more automated process of determining the affected area, saving processing time and moreover, making it possible to integrate GIS data (with SILP) and carry out further spatial analyses.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Regional Directorate of Polish State Forests in Poznań for sharing the data that made this research possible. Special thanks to Mr Leszek Rząsa for the pre-processing of the data reference.

LITERATURE

Boncol B., & Wężyk P., (2012). Fotogrametryczne opracowanie skutków huraganu na obszarze Nadleśnictwa Koszęcin. *Roczniki Geomatyki*, 10(5), 27-35.

Ciesielski M., Bałazy R., Hycza T., Dmyterko E., & Bruchwald A, (2016). Szacowanie szkód spowodowanych przez wiatr w drzewostanach przy wykorzystaniu zobrażeń satelitarnych i danych Systemu Informatycznego Lasów Państwowych. *Sylwan*, 160 (5), 371–377.

Filipek Z. (2008). Szkody w wyniku zjawisk kłęskowych na terenie Lasów Państwowych w ostatnich latach. [in]: *Kłęski żywiołowe w lasach zagrożeniem dla wielofunkcyjnej gospodarki leśnej*. SITLiD, Wyd. Świat, Warszawa, p. 5–13.

Forzieri G., Pecchi M., Girardello M., Mauri A., Klaus M., Nikolov C., Rüetschi M., Gardiner B., Tomastik J., Small D., Nistor C., Jonikavicius D., Spinoni J., Feyen L., Giannetti F., Comino R., Wolynski A., Pirotti F., Maistrelli F., Ionut S., Wurpillot L., Karlsson S., Zieba-Kulawik K., Strejczek-Jazwinska P., Mokros M., Franz S., Krejci L., Haidu I., Nilsson M., Wężyk P., Chirici G., Cescatti A., & Beck P., (2020). A spatially-explicit database of wind disturbances in European forests over the period 2000-2018. *Earth System Science Data*, 12 (1), pp. 257-276.

Gardiner B., Blennow K., Carnus J., Fleischer P., Ingemarson F., Landmann G., Lindner M., Marzano M., Nicoll B., Orazio C., Peyron J., Schelhaas M.-J., Schuck A., & Usbeck T., (2010). *Destructive Storms in European Forests: Past and Forthcoming Impacts*. Final Report to European Commission - DG Environment. Brussels.

Gardiner B., Schuck A., Schelhaas Mart-Jan, Orazio C., Blennow K., Nicoll B., (2013). *Living with Storm Damage to Forests What Science Can Tell Us, What Science Can Tell Us*, European Forest Institute.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850-853.

Hościło A., & Lewandowska A., (2018). Assessment of forest damage caused by the August 2017 hurricane using sentinel-2 Satellite data. *Sylvan*, 162 (8), pp. 619–627.

Kärhä, K., Anttonen, T., Poikela, A., Palander, T., Laurén, A., Peltola, H., & Nuutinen, Y., (2018). Evaluation of Salvage Logging Productivity and Costs in Windthrown Norway Spruce-Dominated Forests. *Forests*, 9, 280.

Kurzawiński A. (2019). Wykorzystanie zobrazowań satelitarnych PlanetScope do oceny zasięgu wiatrolomów w Nadleśnictwie Rudy Raciborskie w 2017 roku. Praca inżynierska. Wydział Leśny Uniwersytet Rolniczy w Krakowie.

Landis J. R., & Koch G. G., (1977). An Application of Hierarchical Kappa-type Statistics in the Assessment of Majority Agreement among Multiple Observers. *Biometrics*, 33(2), 363-374.

Puchniarski, T. 2003. *Kłęski żywiołowe w lasach. Poradnik leśniczego. Metody zapobiegania i likwidacji*. PWRiL, Warszawa

Rich R. L., Frelich L., Reich P. B., & Bauer M. E., 2010. Detecting wind disturbance severity and canopy heterogeneity in boreal forest by coupling high-spatial resolution satellite imagery and field data. *Remote Sensing of Environment*, 114 (2), 299-308.

SFA (Skogsstyrelsen), (2006). Stormen 2005 – en skoglig analys. Meddelande Nr 1 Jönköping: Swedish Forest Agency.

Stempski W., & Jabłoński K., (2015). Effectiveness of mechanized wood harvesting in a tree stand damaged by wind. *Nauka Przyroda Technologie*, 9 (3), 1-12.

Suwała, M. (2000). Pozyskiwanie drewna w warunkach kłęskowych. W: M. Suwała (red.), *Poradnik użytkownika lasu*. Wyd. Świat, Warszawa, p. 278–286.

Suwała M. (2004). Metody oraz koszty i opłacalność pozyskania drewna ze złomów i wywrotów. *Sylvan* (3), 63-71.

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*.

Weindl H. (2006). Reinsurance of Natural Hazards, GeoRisksResearch, MunichRe

Wężyk P., (2006). Integracja technologii geoinformatycznych w analizie uszkodzeń lasu spowodowanych przez huragan w Puszczy Piskiej. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. 16, 547- 556.

Wężyk P., (2020a.) Globalny monitoring lasów. W: Hejmanowska B. & Wężyk P. (Eds.). *Dane satelitarne dla administracji publicznej*. Polska Agencja Kosmiczna. Warszawa, 328-335.

Wężyk P., (2020b). *Trendy w teledetekcji satelitarnej* [in:]: Hejmanowska B. & Wężyk P. (Eds.). *Dane satelitarne dla administracji publicznej*. Polska Agencja Kosmiczna. Warszawa, 392-404.

Wężyk P., Hawryło P., Zięba-Kulawik K. (2019). Post-hurricane forest mapping in Bory Tucholskie (northern Poland) using random forest based up-scaling approach of ALS and photogrammetry-based CHM to KOMPSAT-3 and PlanetScope imagery. *Earth observations advancements in a changing world*. AIT Series, *Trends in earth observations* 1, 45-48.

WYKORZYSTANIE ORTOFOTOMAP LOTNICZYCH ORAZ ZOBRAZOWAŃ SATELITARNYCH SENTINEL-2 W PROCESIE OKREŚLANIA USZKODZEŃ DRZEWOSTANÓW W NADLEŚNICTWIE CZERNIEJEWO (RDLP POZNAŃ) SPOWODOWANYCH PRZEZ HURAGAN

SŁOWA KLUCZOWE: nawałnica, określanie zasięgu uszkodzeń drzewostanów, ortofotomapa lotnicza, Sentinel-2

STRESZCZENIE: W nocy 11/12.08.2017 nad Polską, w pasie o długości niemal 300 km, przeszła bardzo silna nawałnica powodując zniszczenia drzewostanów na obszarze 100 000 ha. Celem prezentowanej pracy było zademonstrowanie implementacji technologii teledetekcyjnych w procesie określania zasięgu uszkodzeń drzewostanów w Nadleśnictwie Czerniejewo (RDLP Poznań) spowodowanych przez wiatr oraz monitorowania postępu prac uprzętających. W pracy wykorzystano wykonane na zlecenie PGL Lasy Państwowe cyfrowe ortofotomapy lotnicze, a także zobrazowania satelitarne z misji Sentinel-2 (ESA). Powierzchnię uszkodzonych drzewostanów określano dwoma metodami, tj.: klasyfikacji nadzorowanej - metoda A oraz progowania wartości znormalizowanego wskaźnika roślinności (NDVI) – metoda B. Otrzymane wyniki porównano do danych referencyjnych uzyskanych na drodze interpretacji wzrokowej wysokorozdzielczych ortofotomap lotniczych RGB dokonanych przez ekspertów RDLP Poznań. Monitorowania postępu prac uprzętających prowadzonych w zniszczonych drzewostanach dokonano w 9 przedziałach czasowych. Analizy przestrzenne GIS wykazały, iż powierzchnia uszkodzonych przez wiatr drzewostanów wyniosła dla metody A oraz B, odpowiednio: 579.16 ha oraz 516.01 ha, przy czym za referencję przyjęto 631.00 ha. Uzyskane w pracy wyniki wskazują na błędy niedoszacowania obszaru zniszczeń drzewostanów, tj.: 51.84 ha (8.2%) dla metody A oraz o 114.99 ha (18.2 %) dla metody B. W ciągu całego analizowanego okresu prace uprzętające wykonano na łącznej powierzchni 762.33 ha uszkodzonych drzewostanów, przy czym największą ich intensywność stwierdzono w pierwszym okresie 4 miesięcy po wystąpieniu nawałnicy. Praca wykazała przydatność nieodpłatnych zobrazowań satelitarnych Sentinel-2 (ESA) w procesie określania zasięgu uszkodzeń drzewostanów, wskazując na metodę klasyfikacji nadzorowanej (algorytm maksymalnego prawdopodobieństwa) jako dokładniejszą, niż korzystanie z wartości wskaźnika roślinnego NDVI.

1. WPROWADZENIE

Gwałtowne wiatry, określane potocznie mianem huraganów bądź nawałnic, są jednym z głównych czynników naturalnych zagrażających lasom ([Weindl, 2006](#)). Oddziałują one w negatywny sposób na gospodarkę leśną na wielu płaszczyznach, tj.: bezpośrednio uszkadzając drzewostany (wiatrowały i wiatrołomy), zmniejszając ich wartość produkcyjną, a także przyczyniają się do gwałtownej dezaktualizacji planów urzędzeniowych i opracowań kartograficznych, ale przede wszystkim zmiany wyników finansowych jednostek zarządzających lasami [Filipek, 2008; Gardiner et al., 2010](#). Bardzo istotnym pośrednim skutkiem uszkodzeń lasów od wiatrów jest ich narażenie na pojawienie się szeregu szkodliwych czynników biotycznych (owadów i grzybów) oraz abiotycznych (np. zmiana warunków klimatycznych poprzez zmianę struktury przestrzennej lasów). Duża koncentracja martwego drewna znajdującego się na uszkodzonych powierzchniach zwiększa poważnie ryzyka pożarów leśnych, a także wystąpienia ognisk gradacyjnych owadów deprecjonujących surowiec ([SFA, 2006; Thorn et al. 2016](#)).

W ostatnich 6 dekadach huragany wyrządziły szkody w lasach Europy stanowiąc ponad 50% wszystkich zniszczeń w tych ekosystemach. Do huraganów o złej sławie, które pustoszyły europejskie lasy, zaliczyć można m.in.: Lothar (26.12.1999), Gudrun (08.01.2005), Kyrill (18.01.2007), Klaus (24.01.2009), Xynthia (28.02.2010) czy Vaia (28.10.2018; [Forzieri et al. 2020](#)). Również na obszarze Polski gwałtowne nawałnice odcisnęły swe piętno na lasach tak jak w przypadku Puszczy Piskiej (04.07.2002; [Wężyk, 2006](#)).

Prezentowane w pracy analizy uszkodzeń drzewostanów od wiatrów były skutkiem gwałtownej burzy z nawałnicą jaka miała miejsce w nocy 11/12.08.2017 roku. Nad południowo-zachodnią i centralną Polską w dniu 11.08.2017 r. ukształtował się silny mezoskalowy układ konwekcyjny z linią komórek oraz superkomórek burzowych, na którego froncie wykształciła się linia szkwałowa. Przemierzając się w kierunku północnym, układ zaczął przybierać kształt pionowego łukowatego wygięcia (ang. *bow echo*), które jest szczególnie niebezpieczne ze względu na towarzyszące mu silne porywy wiatru (<https://lowcyburz.pl>). W czasie nawałnicy prędkość wiatru przekraczała 100 km/h, miejscowo osiągając wartości sięgające 150 km/h. „Nawałnica 100-lecia” jak ją potem nazwano, na obszarze 25 Nadleśnictw z 4 Regionalnych Dyrekcji Lasów Państwowych (PGL LP) uszkodziła około 100 532 ha drzewostanów, a straty oszacowano na około 8.6 mln m³ drewna (www.lasy.gov.pl). Łączna powierzchnia drzewostanów uszkodzonych przez huragan przewidziana do całkowitego odnowienia wyniosła około 29 000 ha. Zakończenie prac uprzętających uszkodzone drzewostany zaplanowano na połowę 2019 roku, a termin zakończenia odnawiania powierzchni pokłeskowych aż na 2023 rok (www.lasy.gov.pl). Koszty likwidacji skutków kataklizmu poniesione przez PGL LP wyniosły 712 mln zł (stan na 09.08.2019 r., www.lasy.gov.pl). Skuteczna organizacja pracy przy zagospodarowywaniu skutków tego rodzaju kataklizmu, obejmującego tak rozległe obszary, możliwa jest jedynie przy użyciu nowoczesnych technologii geoinformacyjnych, do których w pierwszym rzędzie należy zaliczyć zobrazowania satelitarne (optyczne i mikrofalowe) czy też lotnicze ([Hościło, Lewandowska, 2018](#); [Kurzawiński, 2019](#); [Wężyk et al. 2019](#)). Celem prezentowanej pracy było zademonstrowanie możliwości implementacji wielospektralnych zobrazowań satelitarnych misji Sentinel-2 (ESA; ang. *European Space Agency*) do procesu podejmowania decyzji w sytuacjach kłeskowych, czyli wsparcia prac zespołów eksperckich oceniających zasięg i intensywność uszkodzeń drzewostanów spowodowanych przez nawałnicę z 11/12.08.2017 roku na terenie Nadleśnictwa Czerniejewo (RDLP Poznań) oraz monitorowanie postępu prac nad usuwaniem powalonych lub złamanych drzew w celu założenia nowych upraw leśnych. Praca w swoim założeniu miała być także demonstracją praktycznego wykorzystania danych satelitarnych Sentinel-2 (ESA) w sytuacjach kryzysowych i likwidacji ich skutków.

2. OBSZAR BADAŃ

Analizy prowadzono na terenie Nadleśnictwa Czerniejewo, należącego do Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Poznaniu. Obszar Nadleśnictwa znajduje się w zasięgu powiatów: poznańskiego, średzkiego, wrześnińskiego i gnieźnieńskiego. Powierzchnia leśna Nadleśnictwa wynosi 13 644 ha, a obszar administracyjny obejmuje 91 000 ha.

Nadleśnictwo Czerniejewo charakteryzuje się stosunkowo żyznymi siedliskami leśnymi, w których siedliska lasowe i olsy stanowią ponad 80% powierzchni leśnej.

W składzie gatunkowym drzewostanów największy udział ma sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. (59.6%) oraz: dąb szypułkowy *Quercus robur* L., olsza czarna *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., brzoza brodawkowata *Betula pendula* Roth oraz jesion wyniosły *Fraxinus excelsior* L.

3. METODYKA

Tuż po kataklizmie, RDLP w Poznaniu zamówiła w firmie fotolotniczej wykonanie nalotów fotogrametrycznych i sporządzenie ortofotomap lotniczych w kompozycji RGB. Posługując się kluczem fotointerpretacyjnym, zespół ekspertów RDLP Poznań opracował zasięgi poszczególnych klas uszkodzeń drzewostanów od wiatru. Wydzielenia z uszkodzeniami stanowiącymi do 30% całkowitej ich powierzchni przypisano do tzw. „klasy 30”, wydzielenia z uszkodzeniami 30-50 % całkowitej powierzchni do „klasy 50” a wydzielenia z uszkodzeniami > 50% do „klasy 100”. Wyniki tej interpretacji ortofotomap lotniczych z sierpnia 2017 w postaci plików wektorowych Shapefile Esri, otrzymali autorzy prezentowanej pracy jako referencyjne dane do zasięgu uszkodzeń. Przeanalizowano także kolejność prowadzonych w terenie prac uprzętających w drzewostanach uszkodzonych przez nawałnicę. Rok po nawałnicy, RDLP w Poznaniu zamówiła kolejny zestaw ortofotomap lotniczych, który został także udostępniony do badań naukowych autorom prezentowanej pracy. Łącznie wykorzystano więc dwa zestawy ortofotomap lotniczych RGB (GSD 0,15m) wygenerowane w oparciu o zdjęcia lotnicze pozyskane w: sierpniu 2017 oraz sierpniu 2018 roku, a także serie czasowe wielospektralnych zobrazowań satelitarnych z misji Sentinel-2 (ESA). Sentinel-2 to konstelacja dwóch bliźniaczych satelitów (S-2A oraz S-2B) krążących po orbicie okołobiegunowej, zarządzana przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA) w ramach programu Copernicus. Satelity S-2 wyposażone są w sensor wielospektralny (ang. MultiSpectral Instrument; MSI), który pozwala na rejestrację sceny o boku 290 km (udostępniane jako tzw. granule o boku 100 km), w 13 kanałach spektralnych o różnych rozdzielczościach przestrzennych (kanały: B2, B3, B4, B8 – GSD 10 m; kanały: B5, B6, B7, B8A, B11, B12 – GSD 20 m; kanały: B1, B9, B10 – GSD 60 m). Rozdzielczość radiometryczna danych S-2 wynosi 12 bitów, a czasowa (okres rewizyty dwóch satelitów wynosi) około 5 dni. Zobrazowania S-2 pobrano z serwisu Copernicus Open Access Hub jako produkt L2A (poddany korekcji atmosferycznej). Do określenia powierzchni szkód w drzewostanach wyrządzonych przez nawałnicę posłużyło zobrazowanie satelitarne S-2 zarejestrowane dnia 28.09.2017 r. (ze względu na wcześniej panujące złe warunki atmosferyczne) dopiero 48 dni po kataklizmie. Zasięgi zobrazowań S-2 ograniczono warstwą wektorową oddziałów leśnych z Leśnej Mapy Numerycznej (źródło: Bank Danych o Lasach Nadleśnictwa Czarniejewo).

W kolejnym kroku pracy (metoda klasyfikacji – A) przystąpiono do procesu klasyfikacji nadzorowanej w środowisku ArcGIS Pro (Esri), wykorzystując w tym celu algorytm największego prawdopodobieństwa (ang. Maximum Likelihood; ML). Klasyfikację prowadzono z użyciem kanałów: 2 (Blue), 3 (Green), 4 (Red) oraz 8 (NIR) satelity S-2 (ESA), o rozdzielczości przestrzennej (GSD) 10 m. Na potrzeby pracy wyróżniono tylko 2 klasy drzewostanów, tj.: „USZKODZONE” (*Value=1*) reprezentujące drzewostany uszkodzone przez nawałnicę (niezależnie od stopnia intensywności uszkodzenia; klasy referencyjne 30-100%) oraz „NIEUSZKODZONE” reprezentujące drzewostany, których nawałnica nie zniszczyła (*Value=2*). Pola treningowe wyznaczano

w obszarach o niewielkiej zmienności wartości pikseli. Klasę „USZKODZONE” reprezentowały łącznie 72 pola treningowe (ang. AOI; *Area of Interest*) o średniej wielkości około 0.56 ha, a klasę „NIEUSZKODZONE” - 59 AOI o średniej wielkości 0.91 ha. Sklasyfikowane zobrazowanie S-2 zostało poddane filtracji izolowanych pikseli należących do klasy „USZKODZONE” w celu generalizacji wyników. Posługując się narzędziem *Region Group* wyodrębniono pojedyncze odizolowane piksele tej klasy, a następnie przypisano im wartość klasy „NIEUSZKODZONE” za pomocą narzędzi *Nibble* oraz *Set Null*.

Drugą wykorzystaną w pracy metodą (B) określania rozmiaru szkód w drzewostanach od nawałnicy, było zastosowanie progowania wartości znormalizowanego różnicowego wskaźnika roślinności (ang. NDVI; *Normalised Difference Vegetation Index*). W tym celu wykorzystano kanał 4 (Red) oraz 8 (NIR) Sentinel-2 (ESA) o rozdzielczości przestrzennej (GSD) 10 m. Kluczowe dla poprawnego rozgraniczenia zasięgu 2 zdefiniowanych klas („USZKODZONE” oraz „NIEUSZKODZONE”) było określenie wartości progowej NDVI. Na podstawie fotointerpretacji kompozycji CIR (843) zobrazowań Sentinel-2 oraz ortofotomapy lotniczej RGB wartość progową wskaźnika określono na poziomie 0.72. Piksele o wartościach poniżej tego progu zostały zaliczone do klasy „USZKODZONE”, a o wartości powyżej progu do klasy „NIEUSZKODZONE”.

Do monitorowania postępu prac uprzętających uszkodzone drzewostany wykorzystano serię czasową 8 zobrazowań S-2 (daty rejestracji: 25.02.2018, 06.04.2018, 06.05.2018, 05.07.2018, 04.08.2018, 13.10.2018, 27.03.2019 oraz 24.08.2019) a także mapy z tzw. rozliczenia prac wykonanych w Nadleśnictwie Czarniejewo (RDLP Poznań) reprezentujących stan uprzętnięcia powierzchni na dzień 30.12.2017 oraz 30.12.2018. Na tej podstawie zdefiniowano 9 okresów kontrolnych (Tabela 1). Analizę monitorowania prac przygotowania drzewostanów zniszczonych do odnowienia rozpoczęto od wektoryzacji wydzieł uprzętniętych do dnia 30.12.2017 r. (na podstawie danych udostępnionych przez RDLP Poznań). Posługując się zestawami przetworzonych wielospektralnych zobrazowań satelitarnych (kompozycje CIR, RGB sklasyfikowane obrazy rastrowe oraz klasy wg. progowania wskaźnika NDVI) dla kolejnych dat rejestracji obrazów S-2 oraz dostępnych ortofotomap lotniczych, wektoryzowano obszary drzewostanów uprzętnięte w poszczególnych okresach (Tabela 1).

4. WYNIKI

Powierzchnia uszkodzeń drzewostanów Nadleśnictwa Czarniejewo (RDLP Poznań) ustalona na podstawie klasyfikacji (metoda A) sceny Sentinel-2 (28.09.2017) z wykorzystaniem algorytmu ML wyniosła 579.16 ha. Kontrola jakości klasyfikacji została przeprowadzona w oparciu o macierz błędów oraz współczynnik Kappa Cohena. Dokładność producenta (ang. *producer's accuracy*) dla klasy „USZKODZONE” wyniosła 0.96 a dla klasy „NIEUSZKODZONE” 0.89. Dokładność użytkownika (ang. *user's accuracy*) kształtowała się odpowiednio na poziomie 0.88 oraz 0.96. Ogólna dokładność klasyfikacji (ang. *overall accuracy*) klasyfikacji wyniosła 0.92 a współczynnik Kappa przyjął wartość 0.84 co oznacza wysoką zgodność sklasyfikowanego obszaru uszkodzeń drzewostanów względem danych referencyjnych ([Landis, Koch, 1977](#)).

Stosując drugą metodę (B) progowania wartości wskaźnika NDVI uzyskano 516.01 ha uszkodzonych drzewostanów. Dane referencyjne z interpretacji ortofotomap lotniczych RGB wskazywały jednak na 631.00 ha. Tym samym błąd niedoszacowania dla metod A oraz B bazujących na zobrazeniach S-2 (ESA) wyniósł odpowiednio: 51.84 ha oraz 114.99 ha. Błąd względny zastosowanych metod wyniósł odpowiednio 8.2% oraz 18.2%.

Całkowita powierzchnia uprzątniętych zniszczonych od nawałnicy drzewostanów na terenie Nadleśnictwa Czarniejewo, w całym analizowanym okresie 743 dni, wyniosła 762.33 ha. Dynamikę wykonywania prac uprzątających na obszarze pokłęskowym zaprezentowano w Tabeli oraz na mapie (Rys. 5). Najwięcej uszkodzonych drzewostanów zostało uprzątniętych w ciągu okresu nr 1 (Tabela 2), trwającego pierwsze 140 dni (12.08.2017-30.12.2017). Rozmiar powierzchniowy oraz intensywność (uprzątnięta powierzchnia w okresie kontrolnym przeliczona na dzień kalendarzowy) uprzątanych powierzchni była największa w pierwszym półroczu zaraz po kataklizmie, z kulminacją intensywności prac w trzecim okresie, w którym uprzątano 2.12 ha dziennie. Wraz z upływem czasu, intensywność prac malała, jednak zauważalny wzrost odnotowano w okresie nr 7 (Tabela 2).

Odnosząc dane dotyczące uprzątanych powierzchni do rozmiaru powierzchniowego uszkodzeń określonego w pracy metodą klasyfikacji nadzorowanej (Tabela 2), w przeciągu całego analizowanego okresu uprzątnięto niemal 430 ha uszkodzonych drzewostanów, czyli prawie 70% powierzchni sklasyfikowanej na podstawie zobrażeń satelitarnych S-2 „USZKODZONE”. Na podstawie danych S-2 stworzono mapę postępu uprzątania obszaru pokłęskowego (Rys. 5). Analiza uprzątanych wydzieleń porównana z klasą uszkodzeń określoną przez zespół ekspertów RDLP Poznań (Rysunek 4) wykazała, że w pierwszej kolejności uprzątane były fragmenty wydzieleń leśnych zaklasyfikowanych jako całkowicie zniszczone („klasa 100”). W pierwszym okresie (12.08.2017 – 30.12.2017; Tabela 1) uprzątnięto łącznie 195.23 ha drzewostanów zinterpretowanych jako „klasa 100”, co stanowiło niemal 60% powierzchni całej klasy. Autorzy pracy nie byli w stanie wskazać konkretnego schematu kolejności podejmowania prac uprzątających. Odnotować jedynie należy dość niski udział „klasy 100” we wszystkich okresach, poza pierwszym (Rysunek 4) co wskazywać by mogło, iż prace rozpoczęto od całkowicie zniszczonych fragmentów, ale prawdopodobnie z zachowaną infrastrukturą drogową umożliwiającą dostęp ciężkiego sprzętu do tych obszarów.

5. DYSKUSJA

Powierzchnia drzewostanów Nadleśnictwa Czarniejewo (RDLP Poznań) uszkodzonych przez huragan 11/12.08.2017 r. określona na podstawie klasyfikacji nadzorowanej (algorytm ML; metoda A) wielospektralnego (kanały: B2, B3, B4 oraz B8; GSD 10 m) zobrażenia Sentinel-2 (ESA) okazała się być zaniżona o około 8% w stosunku do danych referencyjnych. Była ona jednak wciąż o kolejne 10% lepsza niż w sytuacji zastosowania kryterium progowania wskaźnika NDVI (opartego na kanale NIR oraz Red; metoda B). Wynik klasyfikacji ML opartej na odpowiedniej liczbie pól treningowych można ocenić jako zadowalający. Większe błędy, jakie towarzyszyły progowaniu NDVI, wynikać mogą z faktu występowania dość zróżnicowanego runa i podszytów na żyznych siedliskach lasowych w Nadleśnictwie Czarniejewo. Zniszczenie (np. złamanie pnia) czy usunięcie górnego piętra drzewostanu prowadzić może do odsłonięcia warstwy runa, podszytów i podrostów, które charakteryzować się mogą stosunkowo wysoką wartością NDVI. Bez

informacji na temat zmian wysokości drzewostanu, analiza ta oparta tylko na wartości normalizacji 2 kanałów wydaje się być szybka, jednak obciążona ryzykiem błędu.

Podobne analizy czasowe możliwe są do wykonania w oparciu o algorytm opracowany przez grupę naukowców z Maryland University oraz NASA ([Hansen et al. 2013](#)). Aplikacja wykorzystując bogate archiwa zobrazowań satelitarnych Landsat (NASA) oraz silnik obliczeniowy Google Earth Engine, po nieznacznych modyfikacjach udostępnionego publicznie skryptu ([Wężyk, 2020](#)) daje możliwość określenia ubytku w powierzchni leśnej w zadanym okresie (2000-2018) w skali globalnej. Dla Nadleśnictwa Czerniejewo w roku wystąpienia huraganu (2017 r.) przy pomocy aplikacji GEE ubytek (ang. *loss*) powierzchni leśnej określono na poziomie 540 ha, co jest zbliżoną wartością do wyników otrzymanych przez autorów tej pracy. Pamiętać należy, iż rozdzielczość terenowa zobrazowań Landsat-8 LDCM (NASA) wynosi jedynie 30 m GSD.

Bardzo zbliżone wyniki określenia powierzchni zniszczeń spowodowanych przez nawałnicę w drzewostanach Nadleśnictwa Czerniejewo, uzyskały [Hościło and Lewandowska \(2018\)](#) przy wykorzystaniu tej samej sceny Sentinel-2 (ESA) ale innego wskaźnika teledetekcyjnego. Autorki wykorzystywały Znormalizowany Różnicowy Wskaźnik Wilgotności ($NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$) bazujący na kanałach bliskiej podczerwieni NIR (B8) oraz środkowej podczerwieni SWIR (B11). W sytuacji stosowania kanałów SWIR o GSD 20 m, czytelnika może trochę dziwić bardzo niewielka różnica w wynikach (0.9 ha) w stosunku do rezultatów klasyfikacji obrazów o GSD 10 m (metoda A). Trudności w klasyfikacji zniszczeń w drzewostanach od wiatru polegają bowiem na ogromnym zróżnicowaniu samych uszkodzeń. Może zdarzyć się, że drzewa pomimo iż zostały obalone przez wiatr, wciąż posiadają funkcjonujące w jakimś stopniu systemy korzeniowe, a ich aparat asymilacyjny przez jakiś czas pozostaje żywy. W przypadku całkowicie złamanych pni i koron drzew sytuacja jest łatwiejsza, szczególnie po dłuższym czasie, kiedy rozpoczyna się śmierć fizjologiczna komórek tworzących igły bądź liście drzew. Zastosowanie sceny S-2 zarejestrowanej dopiero po 48 dniach po kataklizmie do określania uszkodzeń drzewostanów mogło okazać się pomocne, właśnie dzięki detekcji zmian zachodzących już procesów fizjologicznych w obłamanych koronach drzew. Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na pierwszą w Polsce implementację obrazów teledetekcyjnych pochodzących z chmary nanosatelitów PlanetScope Dove (Planet Labs; 4 kanały spektralne; GSD 3.0 m) dla celów szacowania uszkodzeń drzewostanów od wiatrów. Sceny satelitarne pozyskano już trzeciego dnia po przejściu nawałnicy w Borach Tucholskich ([Wężyk et al. 2019](#)). Na podstawie automatycznej analizy obrazu (metoda GEOBIA) oraz analizy wielu zmiennych (wskaźniki roślinności, wartości kanałów spektralnych przed i po huraganie) oraz uczenia maszynowego (ang. Machine Learning), dokonano predykcji zasięgu poszczególnych klas uszkodzeń drzewostanów sosnowych (4 klasy; co 25%) z niewielkim błędem (RMSE 7.1%; ME 1.9%; R2 0.82) dla poziomu wydzielenia leśnego. Wyniki zastosowanej analizy GEOBIA udowodniły możliwość błyskawicznego użycia scen satelitarnych w sytuacjach klęskowych – już po kilku dniach od huraganu. W tej samej pracy ([Wężyk et al. 2019](#)) autorzy wykorzystali bardzo wysokorozdzielczy obraz satelitarny Kompsat-3 (4 kanały spektralne; PAN 0.7m GSD; MS 2.8m GSD; dzięki uprzejmości SIIS) zarejestrowany w dniu 31 sierpnia 2017 roku. Pomimo prawie 4-krotnie lepszej – w stosunku do obrazów PlanetScope Dove – rozdzielczości przestrzennej oraz 2 tygodnie późniejszej akwizycji (zapoczątkowane zmiany fizjologiczne w koronach zniszczonych drzew), wyniki klasyfikacji okazały się niemal identyczne (RMSE

8%, ME 3.2%, R2 0.81) dla predykcji klasy uszkodzenia na poziomie wydzielenia leśnego. Należy jednak nadmienić, że w analizie GEOBIA wykorzystane zostały chmury punktów IPC (*Image based Point Cloud*) wygenerowane metodą dopasowania zdjęć lotniczych wykonanych we wrześniu 2017 roku (25 cm GSD, Metashape Agisoft, SfM) oraz dane ALS LiDAR z 2012 roku, w celu wygenerowania Modelu Koron Drzew (MKD) przed i po nawałnicy (Wężyk, 2020a). Znane jest również wykorzystanie zobrazowań satelitarnych IKONOS-2 (PAN GSD < 1 m) do oceny zniszczeń spowodowanych przez wiatr w lasach borealnych. Rich (2010) wykorzystując zobrazowania IKONOS-2 (SpaceImaging /DigitalGlobe) uzyskał korelację ($R^2=0.65$, $p<0.0001$) z danymi referencyjnymi na temat zasięgu uszkodzeń.

Wciąż, jak pokazuje praktyka, sprawdzoną alternatywą dla zobrazowań satelitarnych jest wykorzystywanie tradycyjnych nalołów fotogrametrycznych (Boncol, Wężyk, 2012) prowadzonych z samolotów z wykorzystaniem kamer cyfrowych wielko- i średnio-formatowych. Jest to jednak dość kosztowne, czasochłonne i skomplikowane logistycznie przedsięwzięcie ze względu na wielkopowierzchniowy charakter szkód i bywa, że ograniczoną dostępność wykonawców (np. zajętych realizacją dużych kampanii fotolotniczych). Zdarza się jednak, iż rozdzielczość przestrzenna (GSD) sięgająca kilku- czy kilkunastu centymetrów przeważa, za podjęciem decyzji o zamówieniu nalotu fotogrametrycznego. Decydujące o powodzeniu są i tak warunki meteorologiczne, które czasem bardziej sprzyjają firmom fotogrametrycznym, a czasem dostawcom satelitarnym (brak konieczności uzyskiwania ewentualnych zezwoleń czy certyfikatów). Istnieją oczywiście możliwości wykorzystania niskopułapowych platform, czyli bezałogowych statków powietrznych (BSP), jednak w warunkach PGL LP najczęściej ograniczają się one do nalotu kilkudziesięciu hektarów ze względu na fakt, iż zwykle wykorzystuje się wielowirnikowce (ang. *multirotor*) zamiast płatowców (ang. *fixed-wing*) do tego typu inwentaryzacji. BSP oferują szerokie możliwości pozyskania zobrazowań o rozdzielczości przestrzennej rzędu kilku centymetrów, stosowania kamer wielo- czy hiperspektralnych lub wręcz wykorzystania technologii skanowania laserowego (ang. LiDAR; ULS – *Unmanned Laser Scanning*) jednak na ograniczonym areale. Zobrazowania satelitarne (w przypadku satelitów komercyjnych) charakteryzują się znacznie niższymi kosztami w przeliczeniu na jednostkę powierzchni drzewostanu w porównaniu ze zdjęciami lotniczymi, oferując często wyższą rozdzielczość spektralną, ale niższą rozdzielczość przestrzenną. Obecnie firma MAXAR oferuje obrazy satelitarne odpowiednio wzmocnione przetwarzaniem z kanałem PAN 15 cm GSD.

Przy inwentaryzacji uszkodzonych przez wiatr drzewostanów niezwykle cenne są opracowania danych typu 3D pochodzące z wykorzystania np. interpretacji stereopar zdjęć lotniczych lub generowania chmur punktów metodami dopasowania zdjęć lotniczych (ang. *stereo-matching*). Bezsprzecznie chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego (ang. ALS) wzmocnione informacjami pozyskiwanymi ze zdjęć lotniczych są najbardziej precyzyjne, jednak też najdroższe. Warto jednak wykorzystać jako dane referencyjne ogólnopolski zasób chmur punktów ALS LiDAR zgromadzony przy realizacji projektu ISOK (GUGiK). Do danych teledetekcyjnych pozwalających na detekcję zmian struktury pionowej drzewostanów spowodowanych np. przez wiatr należą dane mikrofalowe (np. satelity z misji Sentinel-1), które są rejestrowane w zasadzie niezależnie od warunków meteorologicznych (np. przy pełnym zachmurzeniu czy opadach deszczu). Ich analiza jest bardziej złożona niż danych optycznych, ale oferta dostawców obrazów wciąż się poszerza

o nowe technologiczne rozwiązania z sensorami SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) oferowanych przez firmy ICEYE czy Capella Space ([Weżyk, 2020b](#)). Powierzchnia uszkodzeń spowodowanych wiatrem może stanowić podstawę do dalszych analiz i opracowań GIS. W połączeniu z danymi pochodzącymi z Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP) możliwe jest stosunkowo szybkie obliczenie strat finansowych w oparciu o zasobność uszkodzonych drzewostanów ([Ciesielski, 2016](#)).

Kolejność uprzątania zniszczonych przez wiatr drzewostanów wiąże się z intensywnością i rodzajem ich uszkodzeń, wartością surowca, potencjalnymi odbiorcami sortymentów czy wzrastających zagrożeń pożarowych zależnych od gatunku, siedliska i zgromadzonej biomasy. Nie bez znaczenia jest istniejąca infrastruktura drogowa czy możliwości składowania surowca. W przypadku analizowanego Nadleśnictwa Czerniejewo najszybciej uprzątnięto wydzielenia charakteryzujące się całkowitym uszkodzeniem drzewostanów. Powierzchnie tego typu są wyjątkowo trudne i niebezpieczne do zagospodarowywania z racji koncentracji surowca, dużego zagęszczenia złomów i wywrotów, których pokrzyżowanie dodatkowo utrudnia prace ([Suwała, 2000](#); [Puchniarski, 2003](#)). Pozyskiwanie surowca drzewnego z powierzchni pohuraganowych jest bardziej pracochłonne i mniej produktywnie w stosunku do zdrowych drzewostanów ([Kärhä et al. 2018](#)). Dużym ułatwieniem było wykorzystanie technologii maszynowego pozyskania drewna, która jest szczególnie atrakcyjna ze względu na bezpieczeństwo operatora maszyny, a także dobrą wydajność technologii, umożliwiającą szybkie usunięcie znajdującego się na uszkodzonych powierzchniach surowca drzewnego ([Stempalski, Jabłoński, 2015](#)). Intensywność prac uprzątających w uszkodzonych drzewostanach w ciągu całego badanego okresu wyniosła około 1 ha dziennie. Działania te (największa intensywność oraz powierzchnia uprzątanych wydzieleni w pierwszym półroczu po wystąpieniu nawałnicy) wpisuje się w zalecenia Europejskiego Instytutu Leśnictwa (ang. EFI; [Gardiner et al. 2013](#)), by jak najszybciej usuwać powstałe szkody w obawie o deprecjację surowca oraz ryzyko wystąpienia gradacji szkodników owadzi lub zagrożenia pożarowego. Szybkie pozyskiwanie drewna z uszkodzonych drzewostanów wyzwala jednak często problem natury ekonomicznej, czyli spadek cen surowca na rynku spowodowany jego wysoką podażą, przy jednoczesnym zwiększeniu kosztów jego pozyskania i zrywki ([Suwała, 2004](#)).

6. WNIOSKI

Szacowanie rozmiaru powierzchniowego szkód w drzewostanach powstałych w wyniku wiatru z wykorzystaniem obrazowań satelitarnych staje się coraz bardziej atrakcyjną alternatywą w stosunku do tradycyjnych metod, wykorzystujących inspekcje terenowe, obloty samolotem czy śmigłowcem, czy w końcu sprawdzonych metod fotogrametrycznych (pozyskanie zdjęć i interpretacja ortofotomap lotniczych). Eliminując pracochłonne i podatne na subiektywne błędy interpretatora materiałów fotolotniczych etapy prac, półautomatyczne przetwarzanie obrazowań satelitarnych jawi się jako szybkie, wiarygodne i atrakcyjne cenowo (nawet w aspekcie danych komercyjnych VHRS) rozwiązanie. Dzięki ciągłemu zwiększaniu rozdzielczości czasowej (chmury setek satelitów), spektralnej (zapowiadane niebawem sensory hiperspektralne), terenowej (GSD na poziomie decymetra) i radiometrycznej - potencjał wykorzystania danych satelitarnych w inwentaryzacjach szkód w drzewostanach powodowanych przez wiatr jest bardzo duży, a dokładność osiągniętych wyników jest satysfakcjonująca. Niewątpliwie w przypadku szkód

o charakterze wielkopowierzchniowym, również informacje o strukturze pionowej (wysokość drzewostanu) rejestrowane dzięki skanowaniu z poziomu satelitarnego (np. GEDI lub ICESat-2 NASA; SLS – *Satellite Laser Scanning*) staną się bardzo przydatne. Istotnym jednak ograniczeniem wykorzystania nieodpłatnych zobrazowań satelitarnych misji Sentinel-2 (ESA), w sytuacji naszej strefy klimatycznej, są jednak często niekorzystne warunki atmosferyczne. Ze względu na sensor optyczny (MSI) analizy zobrazowań Sentinel-2 przeprowadza się jedynie na zobrazowaniach pozyskanych w okresach bezchmurnych. Wykorzystanie innych geodanych np. ortofotomap lotniczych, chmur punktów skanowania laserowego (np. ISOK lub z dopasowania zdjęć stereoskopowych), znacząco ułatwia klasyfikację zobrazowań satelitarnych.

Za pomocą klasyfikacji nadzorowanej kanałów spektralnych Sentinel-2 (ESA) z zakresu VIS-NIR oraz progowania wskaźnika NDVI możliwe było zademonstrowanie procesu określania powierzchni uszkodzeń drzewostanów przez nawałnicę w terenie badań. Nieodpłatne zobrazowania rejestrowane w ramach misji Sentinel (program Copernicus) oraz dostępność do bezpłatnego oprogramowania do ich przetwarzania (np. SNAP czy wtyczki Semi-Automatic Classification Plugin do programu QGIS, na licencji GNU General Public License) oznacza, że tego typu analizy mogą być przeprowadzane na szeroką skalę na poziomie nadleśnictw czy innych jednostek w strukturze PGL LP. Coraz częściej występujące w naszej strefie klimatycznej ekstremalne zjawiska pogodowe wiążą się ze zwiększonym ryzykiem wystąpienia wielkoobszarowych uszkodzeń drzewostanów. Rodzi to konieczność opracowania konkretnych scenariuszy postępowania w sytuacjach kryzysowych w PGL LP, opisujących działania niezbędne dla sprawnego zarządzania zaistniałą sytuacją. Procedura szacowania powierzchni obszaru dotkniętego kataklizmem powinna opierać się na przetwarzaniu zobrazowań na zdalnych platformach, zasilanych aktualnymi zobrazowaniami satelitarnymi z misji o różnych okresach rewizyty, takich jak PlanetScope Dove, SkySat (Planet Labs), Sentinel-2 (ESA) czy nawet Landsat-8 (NASA) oraz danych mikrofalowych, takich jak Sentinel-1 (ESA), ICEYE czy Capella Space, umożliwiając ich analizę i przetwarzanie za pomocą stworzonych i zweryfikowanych doświadczalnie przez użytkowników skryptów. Rozwiązanie takie pozwala na dalekie zautomatyzowanie procesu określania powierzchni dotkniętego kataklizmem wpływając na oszczędność czasu przetworzeń a ponadto umożliwiając zintegrowanie danych GIS (z SILP) i prowadzenie dalszych analiz przestrzennych.

Details of authors:

inż. Wojciech Krawczyk
e-mail: wojciech.kravchyk@gmail.com

dr hab. inż. Piotr Węzyk, prof. UR
e-mail: piotr.wezyk@urk.edu.pl

Submitted 1.12.2020
Accepted 31.12.2020

