

Streszczenie

Powstawanie zniszczeń spowodowanych przez wiatr (wiatrowałów, wiatrołomów) jest przede wszystkim uwarunkowane występowaniem wiatrów o dużej prędkości. Na skutek ich oddziaływania drzewo może zostać złamane lub wyrwane z korzeniami. W pierwszym typie śmiertelności drzew skutki geomorficzne i pedogeniczne są znikome. Natomiast w drugim typie system korzeniowy drzewa wraz z glebą zostaje uniesiony i zdeponowany na powierzchni terenu w postaci wykrotu. Formy te są nietrwałe i z czasem ulegają degradacji, co prowadzi do powstania charakterystycznej topografii kopców i zagłębień – sąsiadujących par form wklęsłych i wypukłych o zróżnicowanym zagęszczeniu na jednostkę powierzchni, z których każda para jest pozostałością po jednym wykrocie. Proces wrywania drzew z korzeniami oraz jego skutki stanowią przejaw biomorfodynamiki, rozumianej jako zmiany w formach rzeźby terenu, aktywności procesów geomorfologicznych oraz transporcie materiału powodowane przez działalność organizmów żywych.

Zniszczenia w lasach spowodowane przez wiatr, wraz z towarzyszącymi im formami terenu (wykroty, topografia kopców i zagłębień), mogą być badane w różnych skalach przestrzennych i czasowych, przy użyciu zróżnicowanych metod, takich jak kartowanie terenowe, pobór próbek glebowych, geofizyka, dendrochronologia oraz podejścia cyfrowe, oparte na teledetekcji. Zastosowanie danych teledetekcyjnych oferuje istotne korzyści w porównaniu do innych metod, w tym: 1) duży zasób danych pozyskiwanych obecnie przez instytucje krajowe, z których znaczna część jest publicznie dostępna; 2) wysoka spójność danych umożliwiającą realizację zróżnicowanych strategii badawczych, ścieżek analitycznych i scenariuszy modelowania; oraz 3) regularność pozyskiwania danych, umożliwiającą analizę zmienności zjawisk w czasie.

Celem pracy było opracowanie ilościowej i jakościowej metodologii wykorzystania danych teledetekcyjnych do oceny wpływu wiatrowałów na biomorfodynamikę stoków. Metodologia ta została opracowana dla trzech głównych komponentów istotnych w analizie biomorfodynamiki związanej z działalnością wiatru: obszarów wiatrowałowych, wykrotów oraz topografii kopców i zagłębień. Autor badał, czy dane teledetekcyjne mogą być skutecznie wykorzystane do mapowania wyżej wymienionych elementów z wysoką precyzją przestrzenną i dokładnością wystarczającą do prowadzenia analiz środowiskowych polegających na badaniu zależności między wiatrem, drzewami, a rzeźbą terenu i glebami. Badania przeprowadzono w umiarkowanej strefie klimatycznej, w lasach regla górnego

z dominacją świerka w Karpatach Polskich (Babiogórski Park Narodowy i Gorczański Park Narodowy) oraz w lasach świerkowo-sosnowych w Górach Skalistych w USA (Colorado Front Range).

Kartowanie wiatrołomów w Górach Skalistych oparto na analizie zmian na obrazach sprzed zdarzenia i po zdarzeniu. Wykorzystano analizę wektorów zmian (change vector analysis), w której różnice pomiędzy obrazami opisano dwoma parametrami: magnitudą (magnitude, mgt), oznaczającą intensywność zmiany, oraz kierunkiem (direction, drct), wskazującym jej charakter. Autor wygenerował obraz różnicowy złożony z 12 pasm spektralnych, a następnie obliczył rastry magnitudy i kierunku dla 66 możliwych par pasm. Testowano różne progi wartości mgt i drct w celu uzyskania jak najwyższej dokładności i minimalnego odsetka fałszywie pozytywnych detekcji (FPR). Ostateczny wynik uzyskano przez połączenie rastrow kierunków i magnitudy zmian. Najlepsze rezultaty osiągnięto dla pary kanałów Sentinel-2: 11 i 12, przy wartościach $40^\circ < \text{drct} < 47^\circ$ oraz $\text{mgt} > 0.1$, uzyskując wskaźnik wartości prawdziwie pozytywnych (TPR) równy 66,04% oraz bardzo niski FPR – 0,89%. Zwiększenie TPR jest możliwe, lecz wiąże się z podwyższeniem FPR. Detekcja wykrotów oraz topografii kopców i zagłębień oparta była na danych LiDAR oraz na wyliczonych na podstawie tych danych modelach rastrowych. Analizę dla wykrotów prowadzono w rozdzielczości 0,25 m, natomiast dla topografii kopców i zagłębień testowano trzy numeryczne modele terenu (NMT) o rozdzielczościach 0,1, 0,25 i 0,5 m. Autor opracował model różnicowy, który uwzględniał wysokość wykrotów, powalonych pni oraz zwartego podszytu, poprzez: 1) utworzenie numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) na podstawie interpolacji punktów ostatnich odbić impulsów laserowych o znormalizowanej wysokości < 2 m powyżej powierzchni terenu, oraz 2) odjęcie NMT. Położenie form wyodrębniano na podstawie zamkniętych poziomów, a do klasyfikacji zastosowano różne metody. W przypadku kopców i zagłębień obiekty klasyfikowano w oparciu o lokalizację najwyższych i najniższych punktów w obrębie poligonów zamkniętych poziomów. Dla wykrotów, poligony zamkniętych poziomów klasyfikowano jako „wykroty” lub „artefakty” na podstawie zbioru parametrów wyliczonych dla każdego poligonu oraz zastosowania zestawu reguł filtrujących, w celu wyboru najbardziej efektywnej kombinacji. W kontekście biotransportu, autor zaproponował dwa podejścia do szacowania objętości wykrotów z wykorzystaniem opisanego modelu różnicowego: 1) metodę poziomową (CNT), 2) podejście oparte na statystyce strefowej (ZS). Wyniki zostały zweryfikowane na podstawie pomiarów terenowych (FM) oraz wzoru na objętość półelipsoidy obrotowej, co pozwoliło oszacować ilość materiału glebowego

przemieszczonego w formie wykrotów. Wszystkie etapy analizy zostały zautomatyzowane w języku R. Skuteczność wykrywania wykrotów wyniosła odpowiednio 79,1%, 71,2% i 70,3% dla trzech powierzchni badawczych o wymiarach 100×100 m. Uzyskane objętości były porównywalne z szacunkami opartymi na danych terenowych. Najwyższe wartości biotransportu zostały oszacowane przez metodę ZS, niższe przez metodę CNT, a najniższe przy zastosowaniu pomiarów terenowych (FM). Dokładność wykrywania par kopiec–zagłębienie wyniosła odpowiednio 90,6% i 85,7% dla dwóch analizowanych obszarów, przy czym detekcja samych zagłębień osiągnęła 95,2–96,9%, a kopców – 90,5–93,8%.

Zaprezentowane w pracy metody mają nowatorski charakter w kilku kluczowych aspektach, takich jak: 1) opracowanie sposobów przetwarzania danych LiDAR w celu mapowania wykrotów oraz topografii kopców i zagłębień, 2) opracowanie metod szacowania objętości pojedynczych wykrotów na podstawie danych teledetekcyjnych, 3) pierwsze dla obszaru Ameryki Północnej zastosowanie analizy wektorów zmian do detekcji wiatrołomów, 4) wdrożenie skryptów w języku R automatyzujących całość procesów analitycznych, 5) szczegółowa analiza czynników wpływających na jakość wyników. Wnioski wynikające z przeprowadzonych badań mają istotne znaczenie dla geomorfologii, gleboznawstwa i ekologii lasu, poprzez: 1) zbadanie przestrzennych wzorców rozmieszczenia wykrotów oraz topografii kopców i zagłębień, 2) ilościowe oszacowanie biotransportu spowodowanego wyrywaniem drzew z korzeniami, 3) analizę dotychczas nieopisanego zdarzenia wiatrowego z 2020 roku w rejonie Gór Skalistych w Kolorado, USA.

Słowa kluczowe: obszar wiatrowałowy, wyrywanie drzew z korzeniami, biomorfodynamika, LiDAR, Sentinel-2, analiza wektorów zmian, programowanie w R