

Określenie defoliacji świerka pospolitego na podstawie zobrazowań lotniczych pozyskanych przy pomocy bezzałogowego statku powietrznego

Assessment of common spruce defoliation based on aerial images acquired with on unmanned aerial vehicle

Szymon Stańczyk 

Laboratorium Ochrony Przeciwpożarowej Lasu, Instytut Badawczy Leśnictwa,
Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

*e-mail: stanczys@ibles.waw.pl, nr tel. +48 668 513 951

Abstract. The assessment of tree crown defoliation is a key component of forest health monitoring and forms the basis for reporting under the ICP Forests programme. Currently, direct field assessment remains the standard, but the development and increased availability of unmanned aerial vehicles (UAV's) offer the possibility of partially replacing field assessment with remote methods. The aim of this study was to assess the suitability of RGB images obtained by drone for determining the degree of defoliation of Norway spruce (*Picea abies*) crowns in accordance with ICP Forests guidelines and to compare these results with standard field assessment.

The study included spruce trees (≥ 60 years) from two populations: mountain (Szklarska Poręba Forest District) and lowland (Płońsk Forest District). For each tree, two types of photographs were taken: vertical (from above the top, at a height of approx. 5 m) and oblique (from the side, showing the entire crown). The sample included individuals assigned to five categories of crown damage, including dead trees. The photographs were used for remote assessment, and sample images as well as a diagram of the photography method are presented in Figures 1A/1B–2A/2B. The results were compared with a reference assessment conducted in the field for the same trees, carried out in parallel with the aerial surveys under comparable lighting and phenological conditions.

Imaging was performed using a DJI Mavic 2 Zoom drone. A team of 12 experts (assessors with monitoring experience), who were briefly trained and independently estimated crown defoliation based on 120 images for each type of shot. The assessments were recorded on forms and then compared with the reference assessment. Statistical analyses included both percentage compliance and compliance with damage class assignments (Tables 1 – 2). Operationally, it took about 1–2 minutes to take a complete set of photographs of one tree, saving time compared to standard field inspection.

The results indicate that oblique images more accurately reflect the condition of tree crowns than vertical images. The average agreement between damage classes and field assessments for oblique images was 56% and 46% for vertical images. For oblique shots, the highest agreement was observed in damage category 3 (66%), while for vertical shots it was in category 5. The lowest accuracy was recorded in category 2 (oblique images) and category 1 (vertical images), (Tables 1–2 respectively). Error analysis showed a moderate tendency to overestimate the degree of defoliation (14 cases, average +6.79%) compared to underestimations (10 cases, average –3.84%) (Figures 3–4). Regarding population, the differences between sites indicated a smaller overestimation in the mountain population (2.87%) than in the lowland population (7.47%) (Figures 5–8). Furthermore, 62% of all assessments (for both site types) differed from the reference assessment by ≤ 5 percentage points, confirming the practical usefulness of the method.

The results show that the using BSP in defoliation assessment can significantly support forest health monitoring, especially in stands with dense canopy cover and in areas that are difficult to access. The method is repeatable, operationally fast and feasible in practice, although its use may be limited by compositional factors such as crown overlap and obstructed side visibility in dense stands. Further research should take into account the influence of lighting conditions, flight altitude and configuration.

Słowa kluczowe: świerk pospolity, defoliacja, dron, stan zdrowotny

Keywords: Norway spruce, defoliation, drones, tree stand health

1. Wstęp

Wiedza o stanie zdrowotnym drzewostanów jest jednym z ważniejszych parametrów podczas prognozowania ich produktywności, jak również jakości końcowego produktu, jakim jest drewno. Informację o stanie zdrowotnym, uzyskuje się między innymi dzięki realizowanym corocznie na terenie Europy badaniom monitoringowym. W Polsce w ramach międzynarodowego programu International Co-operative Programme on Assessment and Monitoring of Air Pollution Effects (ICP Forests) prowadzone są prace terenowe, a następnie na ich podstawie przygotowywane są coroczne bazy danych. Program ten realizowany jest z uwagi na konieczność monitorowania dynamicznie zmieniających się warunków wzrostu drzew. Najistotniejszymi obecnie parametrami, mającymi jednocześnie znaczny wpływ na kondycję drzew są warunki pogodowe, głównie występowanie okresowych susz, jak również zagrożenia biotyczne ze strony entomofauny i grzybów patogenicznych (ICP Forests 2016). W niniejszym opracowaniu sprawdzono przydatność aerofotografii wykonanych z poziomu bezzałogowego statku powietrznego (BSP, dron) do oceny parametru defoliacji koron świerkowych w III lub starszej klasie wieku. Ocena wykonana została przez grupę ekspertów z wieloletnim stażem, nabytym podczas realizacji zadań w projekcie corocznego monitoringu lasu. Wyniki porównane zostały do danych uzyskanych standardową metodą oceny. Otrzymane dane posłużyły do określenia przydatności aerofotografii oraz wykorzystania BSP w realizacji zadań monitoringu lasu.

Bezzałogowe statki powietrzne, dzięki małym rozmiarom, znacznej zwrotności i wyposażeniu w wysokiej jakości kamery, dają możliwość przeprowadzenia oceny stanu zdrowotnego z innego ujęcia niż w obecnie stosowanej metodzie naziemnej. W zwartych, wysokich drzewostanach dokonanie dokładnej oceny z poziomu gruntu jest często utrudnione i może być obarczone błędem (Olson i in. 2026; Ecke i in. 2024). Zastosowanie BSP daje dostęp do niewidocznych z poziomu gruntu górnych części koron drzew. Z kamery zainstalowanej na statku powietrznym ocena uszkodzeń korony pozwala analizować poszczególne gałęzie oraz daje możliwość wstępnej identyfikacji przyczyny uszkodzeń.

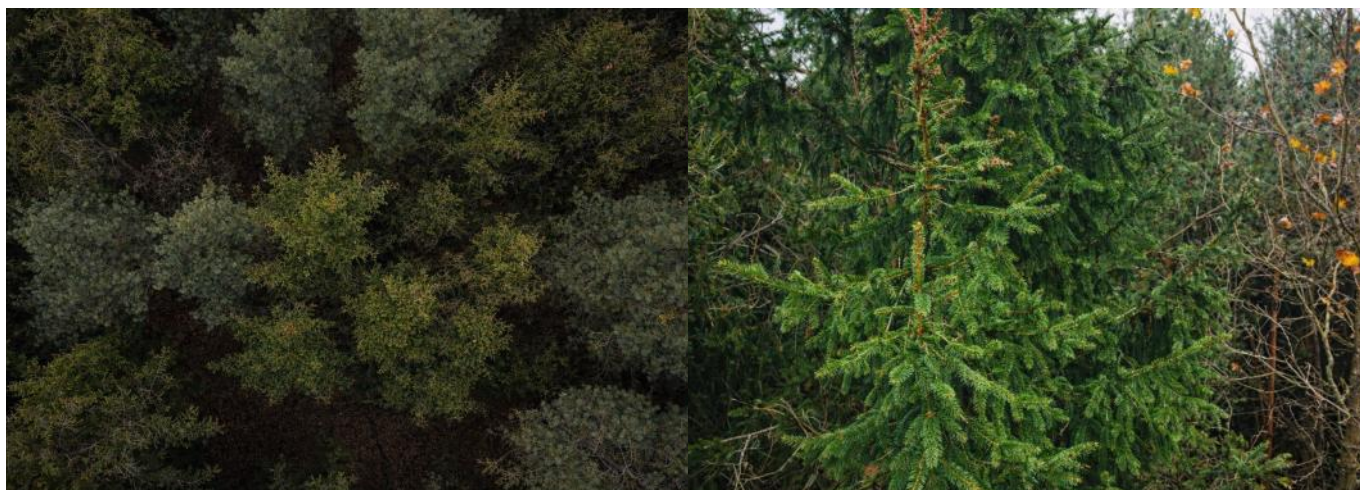
Kondycja zdrowotna drzewostanów świerkowych, wyrażona stopniem defoliacji koron drzew, jest w ostatnich latach najniższa w odniesieniu do innych gatunków iglastych. Wyższą przeciętną defoliację odnotowuje się tylko dla dębów (GIOŚ 2022). Opisywany w niniejszej pracy świerk pospolity (*Picea abies*) jest jednym z głównych gatunków lasotwórczych Polski. Panuje na 5,3% powierzchni leśnej kraju i posiada 5,0-procentowy udział w miąższościowych zasobach leśnych kraju (BULiGL 2022). Występuje głównie w krainie Sudeckiej, Karpackiej oraz Mazursko-Podlaskiej. Na tle pozostałych gatunków iglastych jest również najbardziej podatny na uszkodzenia oraz wpływ negatywnych czynników biotycznych Lech i in. (2021).

1.2. Ocena defoliacji koron drzew świerka przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych

Tradycyjna metoda oceny stanu zdrowotnego drzewostanów opiera się na analizie koron drzew, wykonywanej przez taksatora w terenie. Podejście to, mimo swojej długiej historii i uznanej wartości, wiąże się z szeregiem ograniczeń (Innes 1988). Jednym z istotniejszych problemów jest utrudniony dostęp do niektórych powierzchni badawczych, zwłaszcza w terenach górskich lub okresowo zalanych wodą. Dodatkową trudność stanowi niepełna wizura korony w lasach o silnym zwarcie, gdzie obserwacji podlega wyłącznie jej dolna część.

W drzewostanach charakteryzujących się dużym zagęszczeniem, szczególnie z obecnością liściastego drugiego piętra, precyzyjna ocena stanu koron staje się znacznie utrudniona, a w niektórych przypadkach wręcz niemożliwa (ICP Forests 2006). Często dochodzi również do nakładania się koron sąsiednich drzew, co negatywnie wpływa na wiarygodność uzyskiwanych wyników.

W takich uwarunkowaniach uzasadnione wydaje się zastosowanie technologii BSP niezależnie od warunków terenowych (Ecke i in. 2024). Rozwiązanie to umożliwia prowadzenie oceny wybranych obszarów i obiektów niezależnie od warunków terenowych oraz potencjalnych trudności związanych z dostępnością badanego terenu. Zastosowanie BSP pozwala na pozyski-



Rycina 1A i rycina 1B. Widok koron drzew uzyskanych z wysokości 45 m oraz pędu szczytowego
Figure 1A and figure 1B. View of tree crowns taken from a height of 45 metres and a spruce shoot recorded by a drone

wanie zdjęć w bardzo wysokiej rozdzielczości, nawet z dużych wysokości (ryc. 1A), co umożliwia uchwycenie licznych detali morfologicznych oraz w niektórych przypadkach, identyfikację obecności szkodników.

Kolejną zaletą wykorzystania bezzałogowych statków powietrznych jest możliwość precyzyjnej oceny stanu pędu szczytowego, co w przypadku silnie zwartej struktury drzewostanu jest trudne lub niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych metod (ryc. 1B).

2. Cel i zakres pracy

Zakres niniejszej pracy obejmuje określenie defoliacji świerka pospolitego na podstawie zobrażeń lotniczych. Oceniano przydatność zdjęć w barwach naturalnych RGB wykonanych przez BSP do określenia parametru defoliacji poprzez porównanie wyników oceny zdalnej, przeprowadzonej przez 12 ekspertów do standardowej metody opartej na metodyce ICP forests.

Opracowanie wyników pozwoliło na sformułowanie wniosków dotyczących przydatności oraz możliwości zastosowania zdjęć RGB pozyskanych z pułapu BSP do oceny stanu zdrowotnego drzewostanów, nie tylko świerkowych.

3. Materiał i metody

3.1. Charakterystyka drona wykorzystanego do pozyskania danych zdjęciowych

Do wykonania aerofotografii wykorzystany został bezzałogowy statek powietrzny DJI Mavic 2 Zoom. Dron na jednym, w pełni naładowanym akumulatorze osiąga 33 minuty ciągłego, nieprzerwanego lotu. Taki wynik pozwala na wykonanie zdjęć wszystkich drzew na powierzchni monitoringowej, a następnie bezpiecznego powrotu do operatora.

Każda z powierzchni monitoringowych zawierała 20 drzew. Po przeprowadzeniu wywiadu z grupami realizującymi program monitoringu w różnych częściach Polski, otrzymana średnia dzienna liczba pomierzonych/ocenionych powierzchni wynosi pomiędzy sześć a siedem. Można więc założyć, że jedna grupa monitoringowa jest w stanie dokonać całodziennego oceny mając na swoim wyposażeniu drona wraz z trzema akumulatorami.

Jednostka latająca została wyposażona w czujniki zderzeniowe „Flight Autonomy”. Zapewniają one wykrywanie przeszkód i pomagają w bezpiecznym locie pomiędzy drzewami a także odpowiadają za stabilizację jego pozycji. Dodatkowo, czujniki pomagają wykonywać pomiar odległości co zapewnia maksymalną powtarzalność i wiarygodność wyników.

Kamera w jaką wyposażona została jednostka Mavic 2 Zoom składa się z matrycy: 12 megapikseli, 1/2.3 cala z możliwością wykonania czterokrotnego powiększenia. Kolejnym jej elementem jest 48-milimetrowy teleobiektyw pozwalający na wychwycenie wyraźnych kadrów we wszystkich planach zdjęcia. Kamera zapewnia szeroki i dynamiczny zakres kolorów, przez co można wyraźnie oddzielić min. odbarwione elementy korony oraz różne odcienie zielonej barwy igiel (DJI-ARS. 2023).

3.2. Materiał badawczy

Do analizy wykorzystane zostały korony świerka zarejestrowane na zdjęciach lotniczych, wykonanych w dwóch rzutach. Pierwszym z nich było ujęcie perspektywy pionowej, gdzie statek powietrzny pozycjonowany był nad centralną częścią drzewa w odległości pionowej wynoszącej 5 metrów od wierzchołka pędu szczytowego. Na drugim rzucie uchwycona została perspektywa ukośna. Przy wykonaniu tych fotografii statek ustawiony został na wysokości 3 metrów powyżej wierzchołka, w odległości umożliwiającej objęcie całej powierzchni korony. Dodatkowo wykorzystana została regulacja kąta kamery. Obiektyw kamery pochylony został o wartość kąta wynoszącą od 20 do 35°, w zależności od warunków lotu. Pomiar odległości od drzewa możliwy był dzięki widocznej wartości odległości najbliższej przeszkody wyświetlanej na ekranie kontrolera.

Zdjęcia zostały pozyskane w drzewostanach starszych klas wieku (60 lat i więcej) na terenie dwóch nadleśnictw: Szklarska Poręba (populacja górską) oraz Płońsk (populacja nizinna). Osobniki do oceny dobierane zostały w taki sposób, aby wszystkie 4 kategorie uszkodzeń reprezentowane były przez 14 drzew. Dodatkowo dołączone zostały 4 drzewa z 5-tej kategorii (drzewa martwe).

Wybór drzew oraz sama ocena defoliacji metodą tradycyjną zostały przeprowadzone przez dwie osoby, autora pracy oraz wykwalifikowanego taksatora, posiadającego wieloletnie doświadczenie w zakresie oceny stanu zdrowotnego drzewostanów. Wyniki oceny wykonanej z poziomu gruntu zostały szczegółowo udokumentowane, a następnie posłużyły jako materiał odniesienia do porównania z wynikami analizy przereźnienia koron, uzyskanymi na podstawie zdjęć.

Referencyjna ocena terenowa została przeprowadzona równolegle z wykonaniem zdjęć, co miało na celu zapewnienie porównywalnych warunków oświetleniowych oraz zbliżonego stadium fenologicznego drzew. Dzięki temu możliwe było uzyskanie spójnych danych, minimalizujących wpływ zmiennych środowiskowych na ocenę defoliacji.

3.3 Pozyskanie zdjęć wykorzystanych do oceny stanu zdrowotnego

Do potrzeb badań pozyskano zdjęcia wykonane w dwóch rzutach:

W rzucie pionowym (od góry), dron został ustawiony pionowo nad wierzchołkiem korony drzewa w odległości ok. 5 m od wierzchołka. Kamery skierowano pod kątem 90 stopni w dół. Funkcja optycznego zoomu nie była wykorzystywana (ryc. 2A).

W rzucie skośnym, dron został ustawiony w odległości bocznej ok. 10 metrów od wierzchołka drzewa tak aby zdjęcie obejmowało swym zasięgiem całą koronę (Ryc. 2B). W niektórych przypadkach ograniczenie stanowiło sąsiedztwo innych koron drzew. Pomimo tej niedogodności pozyskano zdjęcia wszystkich drzew. Podobnie jak przy zdjęciach pozyskanych od góry, aparat został ustawiony w trybie automatycznym.

Wykonanie zestawu zdjęć jednego drzewa przez średnioaa-

wansowanego operatora drona zajmuje od 1 do 2 minut. Czas ten jest zależny od poziomu zaawansowania pilota oraz warunków meteorologicznych. Prowadzenie badań tą metodą jest proste i zarazem szybsze niż standardowa metoda oceny, która wymaga lustracji drzewa z 4 stron przez dwuosobowy zespół.

3.4. Ocena defoliacji koron drzew świerka przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych

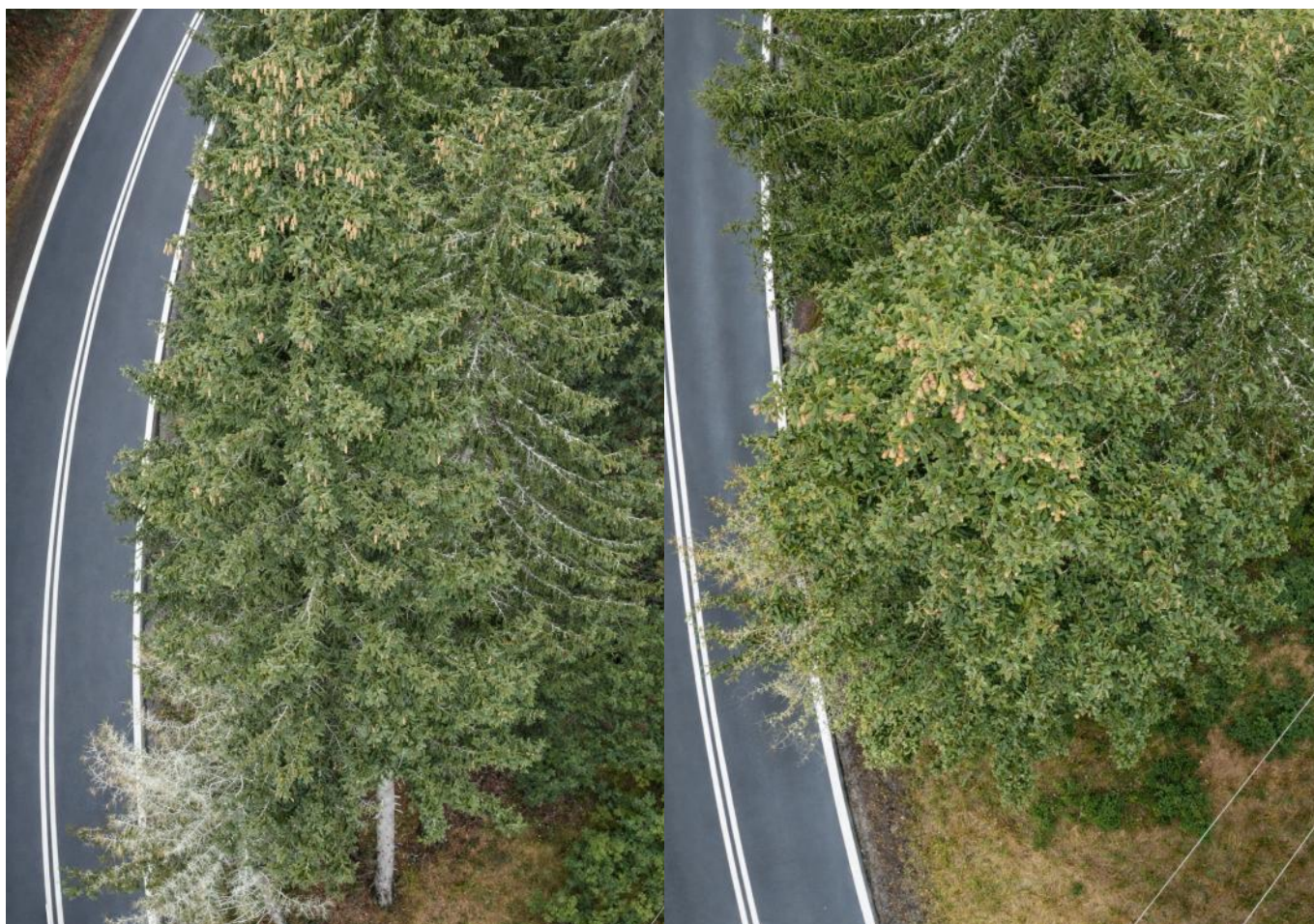
Do oceny defoliacji z wykorzystaniem zdjęć lotniczych, wykonanych z pokładu BSP wybrana została grupa dwunastu ekspertów mających wieloletnie doświadczenie w realizacji corocznego programu monitoringu stanu lasów. Pierwszym etapem badania było przeprowadzenie szkolenia polegającego na ocenie 20 koron w rzucie pionowym oraz 20 w ukośnym. Podczas tego etapu każde ze zdjęć miało przyporządkowaną i z góry znaną defoliację a sam proces „oceny” odbywał się bez limitu czasowego. Po zakończeniu etapu szkolenia oraz krótkiej przerwie ocenianie rozpoczęli rozpoznawanie defoliacji wraz z odnotowywaniem wyników na przygotowanych wcześniej kartach. Etap ten podzielony został na dwie części. W pierwszej kolejności oceniona została defoliacja dla drzew w rzucie pionowym a następnie ukośnym. Każda z nich obejmowała ocenę 60 drzew. Na każdego osobnika przypadały 2 zdjęcia, ustawione w losowej kolejności. Na ocenę pojedynczego osobnika ocenianie mieli 20 sekund. W sumie ocena zdjęć wykonanych

w jednej perspektywie zajmowała 40 minut. Te same osobniki wybrane podczas oceny terenowej brały udział w obu turach oceny, zdjęcia pomieszczone zostały w losowej kolejności.

Wyniki oceny uzyskane za pomocą wcześniej przygotowanych formularzy zostały wprowadzone do arkusza kalkulacyjnego, a następnie porównane z danymi referencyjnymi, pozyskanymi podczas obserwacji terenowych. Na podstawie przeprowadzonych analiz przyporządkowano odpowiednie kategorie uszkodzeń. Kolejnym etapem było opracowanie wyników oceny zdalnej pod kątem zgodności zarówno w zakresie procentowego wskaźnika defoliacji, jak i przypisanej kategorii uszkodzeń w odniesieniu do danych terenowych. Wszystkie uzyskane dane poddano analizie statystycznej.

4. Wyniki

Analiza zgromadzonych danych wykazała, że większą zgodność wyników z oceną terenową uzyskano na podstawie zdjęć wykonanych w rzucie ukośnym. Średni poziom zgodności przyporządkowania klas uszkodzeń z oceną terenową dla tej perspektywy wynosi 56%, co należy uznać za wynik pozytywny i potwierdzający przydatność tej metody w zdalnej ocenie defoliacji. Dla zdjęć pionowych średnia zgodność klasyfikacji z danymi terenowymi wyniosła 46%, co również wskazuje na stosunkowo wysoką trafność, jednak niższą w porównaniu z oceną zdjęć ukośnych.



Rycina 2A i rycina 2B. Korona świerka zarejestrowana w rzucie pionowym oraz ukośnym
Figure 2A and figure 2B. Spruce crown recorded in vertical projection and side projection

Zróznicowanie poziomu zgodności widoczne jest także w poszczególnych kategoriach uszkodzeń. W przypadku zdjęć ukośnych (tab. 1) najwyższą zgodność – na poziomie 66% – uzyskano dla drzew zaklasyfikowanych do 3 kategorii uszkodzeń, co może wynikać z łatwości identyfikacji średniego stopnia defoliacji w tej grupie. Analogicznie, dla zdjęć pionowych (tab. 2) najdokładniejszą klasyfikację zaobserwowano dla drzew zaliczonych do 5 kategorii uszkodzeń, co może być związane z wyraźnymi objawami silnej defoliacji widocznymi z góry.

Z drugiej strony, najniższą trafność klasyfikacji w analizie ukośnej uzyskano dla drzew zaklasyfikowanych do 2 kategorii uszkodzeń, natomiast w przypadku rzutu pionowego najniższy poziom zgodności odnotowano dla 1 kategorii uszkodzeń. Może to świadczyć o trudności w rozróżnianiu niewielkich zmian w defoliacji na podstawie zdjęć, szczególnie w przypadku drzew o minimalnym stopniu uszkodzenia.

Wyniki te stanowią istotny wkład w ocenę skuteczności me-

tod zdalnych i wskazują, które techniki fotograficzne i klasy uszkodzeń wymagają dalszych udoskonaleń w celu poprawy trafności diagnoz stanu zdrowotnego drzewostanów.

Na podstawie danych z formularzy oceny wykonanych przez ekspertów dokonano analizy poprawności zdalnej oceny defoliacji przy użyciu zdjęć lotniczych. Wyniki wskazują, że przeszacowanie defoliacji wystąpiło 14 razy, natomiast niedoszacowanie – 10 razy. Uśrednione wartości błędów dla obu typów rozbieżności wyniosły odpowiednio 6,79% dla przeszacowania oraz 3,84% dla niedoszacowania, co sugeruje umiarkowaną tendencję do zawyżania oceny stopnia defoliacji.

Szczegółowa analiza błędów w zależności od rodzaju zdjęcia wykazała, że w rzucie pionowym, przeszacowanie wystąpiło w 8 przypadkach, a niedoszacowanie w 4. Natomiast w rzucie ukośnym, liczba przypadków przeszacowania i niedoszacowania była równa – po 6 przypadków każdego rodzaju. Wyniki przedstawione zostały na Ryc. 3 i 4. Dane te sugerują, że rzut boczny

Tabela 1. Wyniki zdalnego rozpoznawania defoliacji przy wykorzystaniu aerofotografii w rzucie ukośnym, dopasowanie kategorii uszkodzeń do oceny referencyjnej (wartości procentowe)

Table 1. Results of remote defoliation recognition using oblique aerial photography, matching damage categories to the reference assessment (percentage values)

Kategoria Category	1	2	3	4	5
Oceniający Evaluation					
1	55,6	64,7	76,9	56,5	50,0
2	66,7	47,1	69,2	65,2	33,3
3	55,6	38,2	64,1	82,6	66,7
4	44,4	50,0	84,6	60,9	83,3
5	50,0	14,7	84,6	65,2	50,0
6	27,8	58,8	71,8	47,8	50,0
7	38,9	47,1	64,1	39,1	0,0
8	61,1	58,8	53,9	52,2	83,3
9	61,1	44,1	41,0	47,8	66,7
10	66,7	50,0	74,4	60,9	83,3
11	66,7	47,1	69,2	60,9	50,0
12	77,2	50,0	33,3	43,5	0,0

Tabela 2. Wyniki zdalnego rozpoznawania defoliacji przy wykorzystaniu aerofotografii w rzucie pionowym, dopasowanie kategorii uszkodzeń do oceny referencyjnej (wartości procentowe)

Table 2. Results of remote defoliation recognition using vertical aerial photography, matching damage categories to the reference assessment (percentage values)

Kategoria Category	1	2	3	4	5
Oceniający Evaluation					
1	44,4	55,9	67,5	27,3	66,7
2	0,0	29,4	82,5	22,7	33,3
3	44,4	38,2	65,0	31,8	66,7
4	22,2	32,4	60,0	27,3	66,7
5	16,7	41,2	57,5	50,0	66,7
6	55,6	29,4	40,0	45,5	33,3
7	38,9	32,4	62,5	72,7	83,3
8	44,4	38,2	45,0	22,7	50,0
9	33,3	55,9	62,5	40,9	83,3
10	27,8	29,4	27,5	50,0	83,3
11	55,6	29,4	60,0	68,2	83,3
12	16,7	35,3	65,0	22,7	33,3

może być bardziej stabilnym źródłem informacji przy ocenie defoliacji,

Porównując wyniki w odniesieniu do typu populacji, zaobserwowano różnice w poziomie przeszacowania. Dla populacji górskiej średni błąd przeszacowania wyniósł jedynie 2,87%, co wskazuje na wyższą precyzję oceny. Z kolei w przypadku populacji nizinnej przeszacowanie osiągnęło poziom 7,47%. Uzyskane dane zagregowane zostały do parametru średniej defoliacji a następnie przedstawione na poniższych wykresach (Ryc. 5–8). Prawdopodobną przyczyną tej rozbieżności są bardziej nieregularne kształty koron drzew w terenach nizinnych, które mogą utrudniać jednoznaczną ocenę stopnia defoliacji ze zdjęć lotniczych.

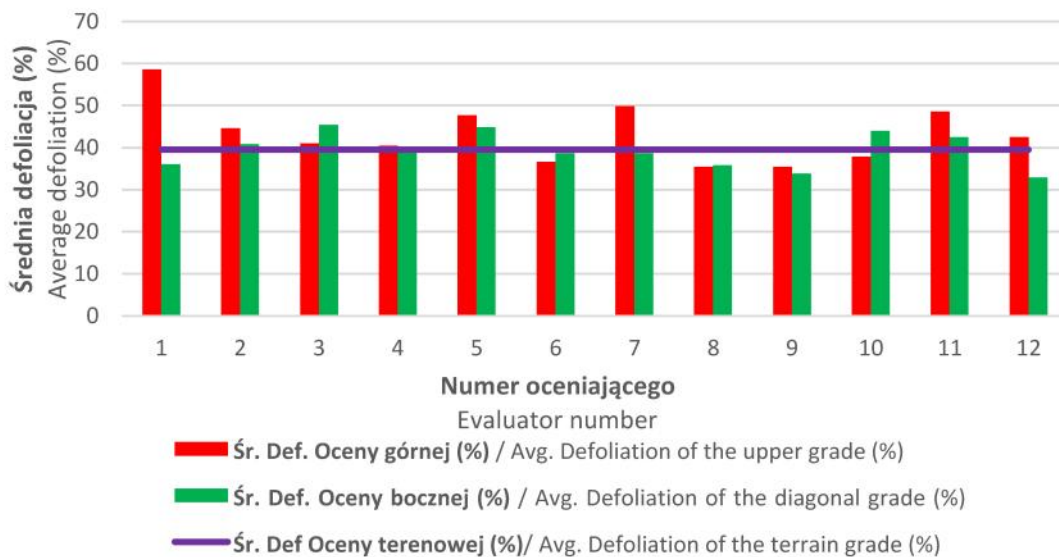
Dopasowanie kategorii uszkodzeń ocenianych na podstawie zdjęć do kategorii ustalanych w terenie również zostało ocenione. W niemal wszystkich analizowanych przypadkach, z wyjątkiem eksperta nr 12, zgodność ocen przekroczyła 50%,

co uznaje się za wartość zadowalającą. Szczególnie wysoki poziom dopasowania odnotowano w przypadku zdjęć wykonanych w rzucie bocznym, co podkreśla użyteczność tej perspektywy w klasyfikacji zdrowotnej drzewostanów.

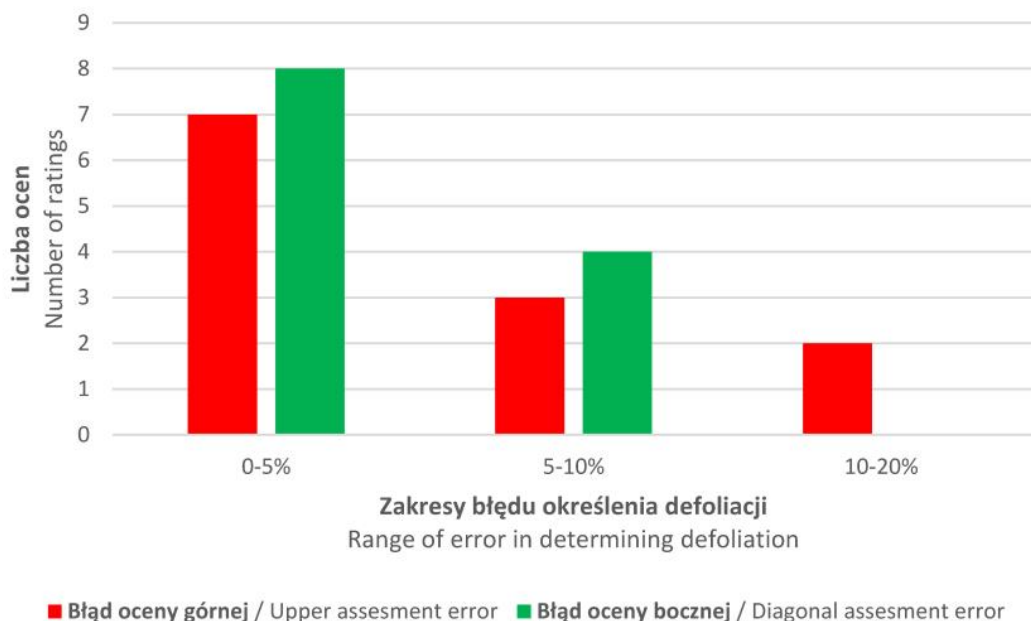
5. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie wyników uzyskanych w ramach badań własnych, a także ich porównania z oceną terenową wykonaną przez doświadczonego taksatora, stwierdzono zasadność zastosowania zdjęć RGB pozyskanych z poziomu BSP jako narzędzia do oceny stanu zdrowotnego drzew. Podobne wnioski dotyczące przydatności tej technologii zostały przedstawione w pracy Kardasza i in. (2017). O poprawności zastosowanej metody świadczą dane porównawcze zawarte niniejszej pracy, zestawiające efekty oceny zdalnej oraz klasycznej, terenowej.

Biorąc pod uwagę fakt, że szacowanie defoliacji ma charak-



Rycina 3. Porównanie średniej defoliacji uzyskanej przez 12 ekspertów ze średnią defoliacją uzyskaną podczas oceny terenowej
Figure 3. Comparison of the average defoliation recorded by 12 experts with the average defoliation measured during the field assessment



Rycina 4. Liczba błędnych ocen w poszczególnych zakresach błędów określenia defoliacji
Figure 4. Number of incorrect assessments in individual ranges of defoliation determination error

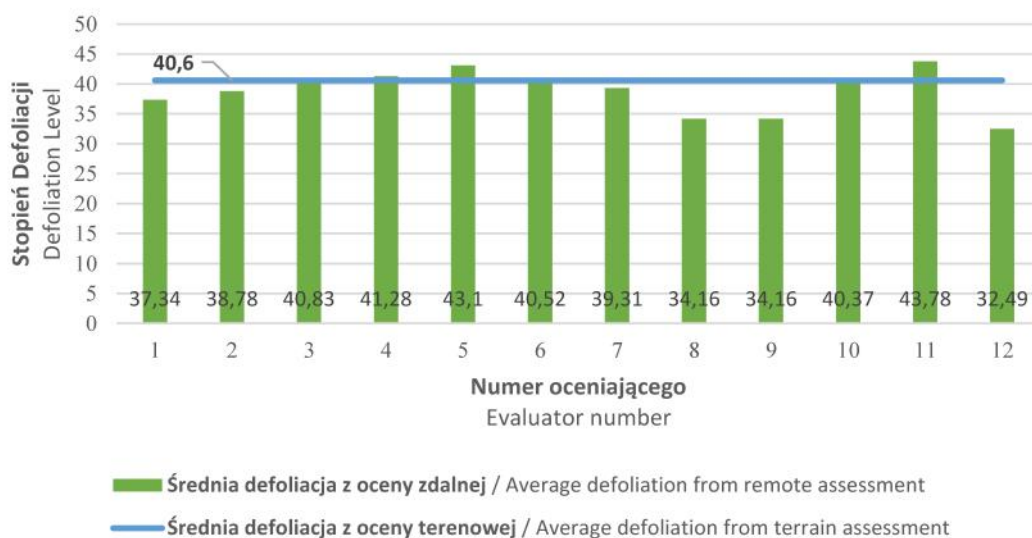
ter subiektywny i może różnić się w zależności od doświadczenia oraz indywidualnej percepcji taksatora, uzyskane wartości należy uznać za zadowalające i wskazujące na przydatność metody opartej na analizie zdjęć RGB. W kontekście zastosowań praktycznych należy również uwzględnić możliwości poprawy dokładności ocen w rzeczywistych warunkach pracy terenowej. Urządzenia BSP wyposażone w wyświetlacze umożliwiające podgląd w czasie rzeczywistym oferują taksatorowi możliwość obejrzenia każdego drzewa w pełnym rzucie 360°, co znacząco poprawia jakość wizualizacji oraz pozwala na bardziej precyzyjne określenie stopnia defoliacji. Co więcej, dane wizualne mogą być zapisywane w formie nagrań wideo lub serii zdjęć, co stwarza możliwość wielokrotnej analizy oraz konsultacji wyników w ramach prac kameralnych.

Dodatkowo, porównanie wyników poszczególnych taksatorów uczestniczących w badaniu wykazało stosunkowo wysoki poziom zbieżności ocen, co może świadczyć o powtarzalności i ograniczonym wpływie czynnika ludzkiego na ostateczne wy-

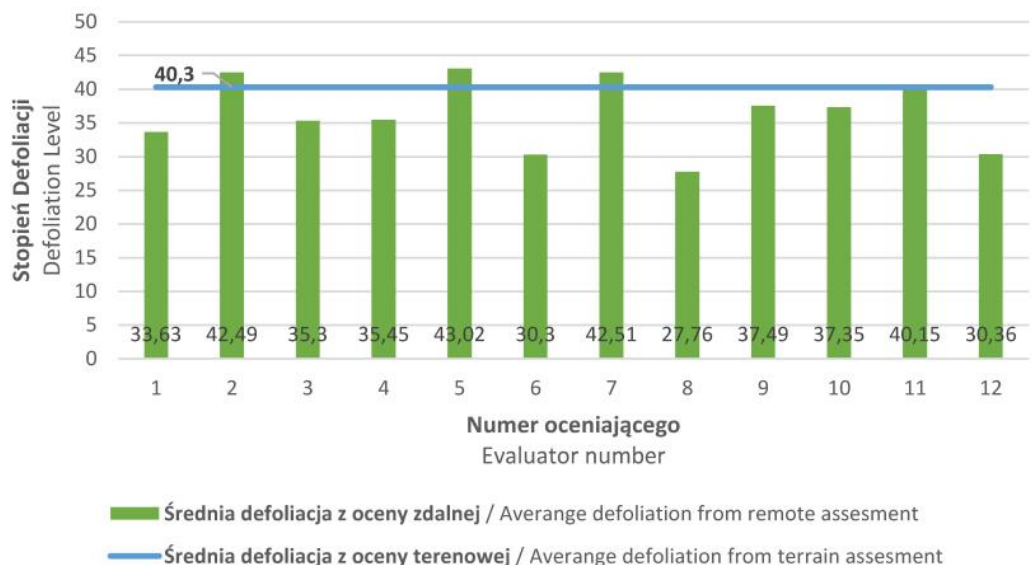
niki. Zbliżone wartości odchyłeń standardowych w obu rzutach wskazują na stabilność ocen oraz niewielkie różnice w interpretacji obrazów w zależności od ich perspektywy.

Warto zaznaczyć, że wysoki poziom zgodności ocen został osiągnięty pomimo ograniczonego zakresu szkolenia taksatorów. W ramach przygotowania do badań uczestnicy ocenili jedynie 20 zdjęć wykonanych w rzucie pionowym oraz 20 w rzucie ukośnym. Fakt ten sugeruje, że proces przygotowania personelu do przeprowadzania ocen na podstawie zdjęć z BSP nie wymaga długotrwałych szkoleń ani zaawansowanej wiedzy technicznej, co znacząco zwiększa dostępność tej metody w praktyce leśnej.

Dodatkowym ograniczeniem był fakt realizacji oceny na podstawie jednej fotografii, z widoczną jedną stroną korony drzewa. Metoda stosowana w praktyce do oceny terenowej wymaga oglądzin wszystkich, czterech stron drzewa co zapewnia maksymalną rzetelność wyników. Ograniczenie to wyniknęło z ograniczeń technicznych sprzętu oraz konieczności realizacji



Rycina 5. Przedstawienie zakresu błędów oceny defoliacji populacji górskiej przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych w perspektywie ukośnej
Figure 5. Representation of the range of errors in assessing defoliation of mountain populations using side-view aerial photographs



Rycina 6. Przedstawienie zakresu błędów oceny defoliacji populacji górskiej przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych w perspektywie pionowej
Figure 6. Representation of the range of errors in assessing defoliation of mountain populations using vertical aerial photographs

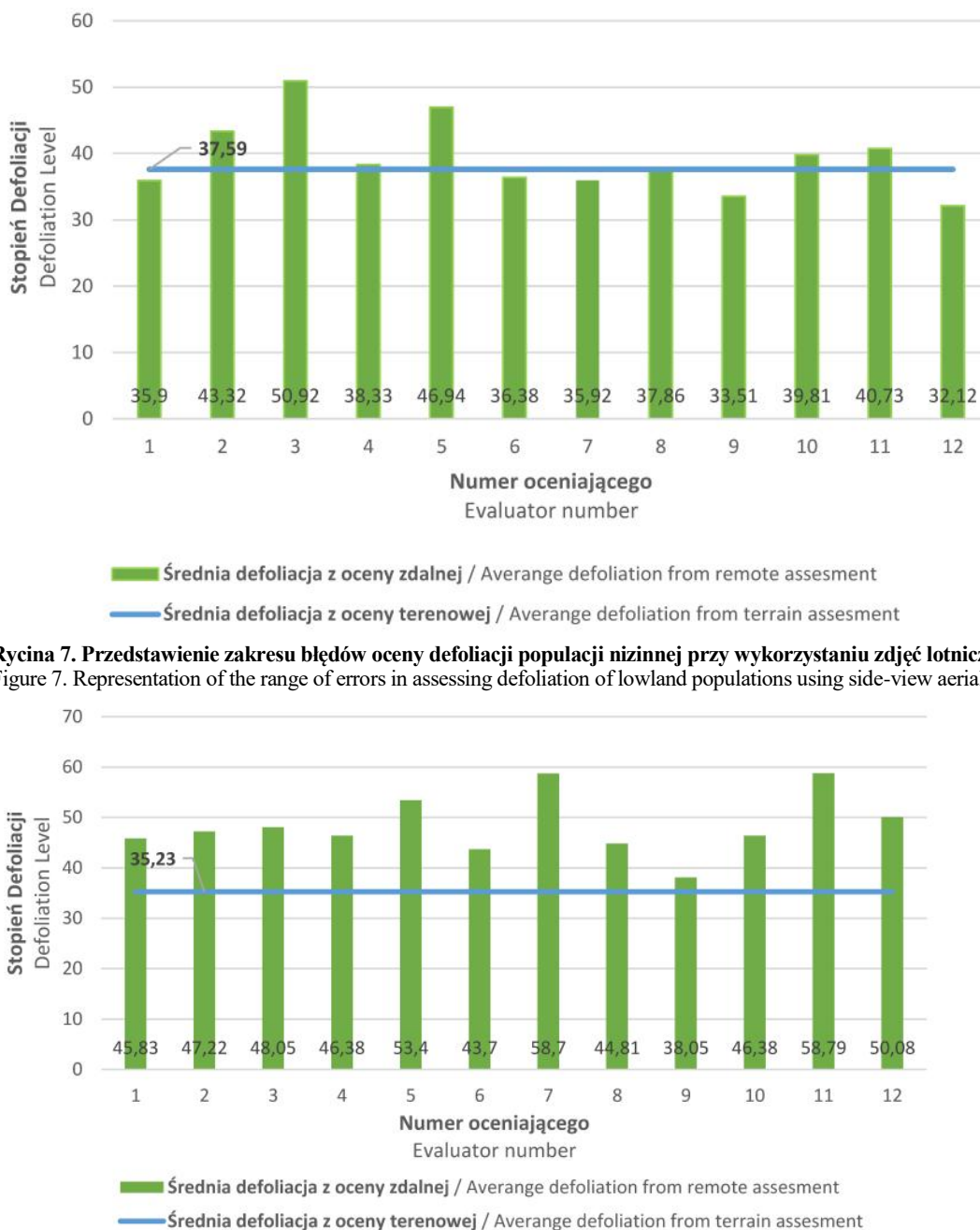
oceny zdjęć przez ekspertów w określonym, ograniczonym wymiarze czasu. Dalszy rozwój metody w przyszłości może wyeliminować ten aspekt poprzez zastosowanie większego zastawu fotografii lub przeprowadzenie oceny już w terenie z zastosowaniem podglądu live.

Podsumowując, wyniki przeprowadzonych analiz wskazują na duży potencjał wykorzystania zdjęć RGB pozyskiwanych z BSP do oceny defoliacji drzew. Pomimo umiarkowanego poziomu dopasowania do ocen terenowych, metoda ta może stanowić cenne narzędzie wspomagające monitoring stanu zdrowotnego drzewostanów, szczególnie w trudno dostępnych terenach lub w sytuacjach wymagających szybkiej reakcji diagnostycznej. Wdrożenie tej technologii w szerszym zakresie wymaga jednak dalszych badań, obejmujących m.in. analizę wpływu różnych wysokości lotu, warunków oświetleniowych

oraz typów kamer na dokładność uzyskiwanych wyników.

Ocenę stanu zdrowotnego przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych wykonali również Szymański i in. (2014), analizując Rogowskie dęby bezszypułkowe (*Quercus Petraea*). Do analizy wykorzystane zostały fotografie lotnicze pozyskiwane od 1981 do 2013 roku. Pomimo wieku zdjęć w pracy otrzymano pozytywne wyniki oraz ułatwi ono proces oceny, z uwagi na możliwość pominięcia etapu pomiarów terenowych. Obecnie w wyniku dynamicznego rozwoju fotografii, wykonywane zdjęcia są znacznie lepszej jakości niż np. 10-let temu. Wpływa to pozytywnie na wiarygodność i dokładność wyników.

Z kolei w pracy Mozgeris i in. (2012), w której do oceny defoliacji koron sosny zwyczajnej (*Pinus Sylvestris*) różnych klas wieku wykorzystano małoformatowe zdjęcia lotnicze, różnice w uzyskanych wynikach w odniesieniu do danych refe-



Rycina 7. Przedstawienie zakresu błędów oceny defoliacji populacji nizinnej przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych w perspektywie ukośnej
Figure 7. Representation of the range of errors in assessing defoliation of lowland populations using side-view aerial photographs

Rycina 8. Przedstawienie zakresu błędów defoliacji populacji nizinnej przy wykorzystaniu zdjęć lotniczych w perspektywie pionowej
Figure 8. Representation of the extent of defoliation errors in lowland populations using vertical aerial photographs

rencyjnych nie przekraczały 1 pp., przy czym w drzewostanach młodszych stwierdzono przeszacowanie oceny na zdjęciach lotniczych, zaś w drzewostanach starszych nieznaczne. Tak niska rozbieżność dla dużej próby obejmującej 500 sosen potwierdza przydatność lotniczej metody oceny. Wysoką dokładność oceny defoliacji na podstawie danych obrazowych zaprezentowano również w pracy Kantola i in. (2010). Zastosowanie lotniczego skanowania laserowego oraz aerofotografii pozwoliło na uzyskanie dokładności klasyfikacji uszkodzeń ubytku igliwia sosnowego na poziomie od 83,7% do 88,1% w stosunku do wyników uzyskanych metodami tradycyjnymi.

Warto zauważyć, że tradycyjna ocena defoliacji prowadzona w terenie wiąże się z istotnym poziomem subiektywizmu. Różnice w percepcji, doświadczeniu i ocenie poszczególnych taksatorów mogą skutkować istotnymi rozbieżnościami, nawet przy ocenie tej samej powierzchni próbnej. Dodatkowo na dokładność ocen wpływać mogą czynniki zewnętrzne, takie jak niekorzystne warunki oświetleniowe, czy ruchy koron drzew spowodowane działaniem wiatru. Wykorzystanie technologii BSP (bezzałogowych statków powietrznych) pozwala w dużym stopniu ograniczyć wpływ tych czynników. Zdjęcia wykonywane z powietrza pozwalają na pełniejszą wizualizację korony drzewa, niezależnie od jego lokalizacji czy stopnia dostępności w terenie. Dodatkową zaletą tej technologii jest możliwość rejestracji materiału wizualnego, co umożliwia jego późniejszą analizę przez zespół specjalistów, zwiększając tym samym powtarzalność i rzetelność ocen.

Niemniej jednak metoda oceny defoliacji z zastosowaniem BSP nie jest pozbawiona ograniczeń. Jednym z najważniejszych wyzwań są aspekty prawne, w tym restrykcje dotyczące lotów BSP na określonych obszarach, co może stanowić istotne utrudnienie w praktycznym zastosowaniu tej metody. Dodatkowo, na terenach o dużym zagęszczeniu drzewostanów mogą wystąpić trudności w pozyskaniu zdjęć w rzucie ukośnym, wynikające z ograniczonej przestrzeni manewrowej oraz ryzyka kolizji drona z przeszkodami.

W kontekście realizacji lotów istotnym aspektem jest również dobór odpowiedniej jednostki latającej, dopasowanej do swoich uprawnień. DJI Mavic 2 Zoom jest sprzętem wyprodukowanym przed 31 grudnia 2023 roku, więc nie jest przypisany do „kategorii otwartej lotów”. Nakłada to nieco większy „pakiet” ograniczeń lotów niż w przypadku nowych jednostek. Pomimo braku kategorii otwartej DJI Mavic 2 Zoom to nadal bardzo dobrej jakości narzędzie do pozyskiwania zdjęć cechujące się wysokiej jakości kamerą, długim czasem lotu oraz nieskomplikowanym pilotażem. Pamiętać należy, że jednostka latająca jest jedynie narzędziem do pozyskania danych i niezależnie od wybranego modelu, mogąc pozyskać zdjęcia jakości 4k, istnieje możliwość realizacji oceny defoliacji przy wykorzystaniu zobrażeń lotniczych.

W niniejszym badaniu uwzględnić należy również jedno ograniczenie mogące wpływać na interpretację wyników. Analiza została oparta na próbie 60 drzew jednego gatunku. Jest to wielkość wystarczająca na etapie pilotażowym, ale do sformułowania wniosków pozwalających na potwierdzenie lub zanego-

wanie metody należy rozszerzyć badanie o większą liczbę osobników. Aspekt jednego gatunku w przypadku opracowania zasad stosowania metody jest zasadny. Pozwala na z uproszczenie procesu nauki rozpoznawania i ograniczenie komplikacji badań. Natomiast aby rozwinąć metodę i dostosować ją do ogółu drzewostanów należałoby rozszerzyć pulę gatunków. Obecny kierunek rozwoju technologii BSP koncentruje się na integracji zaawansowanych metod analizy obrazu, w tym wykorzystaniu sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do automatycznego rozpoznawania i klasyfikowania poziomu defoliacji. Przykładem takiego podejścia jest praca Kálin i in. (2018), w której zastosowano samouczącą aplikację do analizy zdjęć RGB wykonanych z poziomu gruntu. Rozwiązanie to umożliwiło znaczne przyspieszenie procesu oceny przy jednoczesnym ograniczeniu zapotrzebowania na zasoby ludzkie. Uzyskany średni błąd oszacowania na poziomie 7,6% w porównaniu z tradycyjnymi metodami terenowymi wynoszącymi ok. 5% w zależności od taksatora, wskazuje na wysoką skuteczność tej metody oraz jej potencjał w przyszłościowym zastosowaniu do monitorowania stanu zdrowotnego drzewostanów.

W świetle uzyskanych wyników metoda oceny defoliacji na podstawie zdjęć lotniczych wykonywanych w rzucie pionowym oraz ukośnym może być uznana za dojrzałą i możliwą do wykorzystywania w praktyce leśnej, szczególnie na terenach trudnodostępnych. Uzyskane wyniki korespondują z wynikami otrzymanymi w innych badaniach. Rozwój technologii sugeruje również możliwość wprowadzenia w niedalekiej przyszłości w pełni autonomicznych systemów lotniczych, eliminujących konieczność ręcznego sterowania BSP. Automatyzacja procesu pozyskiwania danych oraz ich analiza może przyczynić się do znacznego zwiększenia efektywności i dokładności oceny defoliacji, stanowiąc cenny element nowoczesnego zarządzania zasobami leśnymi.

Konflikt Interesów

Autor deklaruje brak konfliktu interesów.

Źródła finansowania badań

Badania sfinansowano ze środków własnych autora

Literatura

- Banu T.P., Borlea G.F., Banu C. 2016. The Use of Drones in Forestry, *Journal of Environmental Science and Engineering B* 5: 559–563. DOI: <https://doi.org/10.17265/2162-5263/2016.11.007>.
- BULiGL 2022. Wielkoobszarowa inwentaryzacja stanu lasów w Polsce. Wyniki za okres 2017-2021. Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych, Warszawa. https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/Media/Default/Publikacje/WISL2017_2021.pdf (dostęp 23.03.2026)
- Ecke S., Stehr F., Frey J., Tiede D., Dempewolf J., Klemmt H.-J., Endres E., Seifert T. 2024. Towards operational UAV-based forest health monitoring: Species identification and crown condition assessment by means of deep learning, *Computers and Electronics in Agriculture* 219: 108785. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108785>.
- Encyklopedia Lasów Polskich. b.d. Świerk pospolity. <https://www.encyklopedia.lasypolskie.pl/doku.php?id=s:swierk-pospolity> (dostęp 11.12.2024).

- ICP Forests 2006. *ICP Forests Manual*. Visual Assessment of Crown Condition. https://www.icp-forests.net/fileadmin/icp_forests/Dateien/Manual_Versions/2000-09/Chapt2_compl06.pdf (dostęp 15.04.2025).
- ICP Forests 2016. Strategy of ICP Forests 2016–2023.
- Innes J.-L. 1988. Forest health surveys: problems in assessing observer objectivity, *Canadian Journal of Forest Research* 18(5): 560–565. DOI: <https://doi.org/10.1139/x88-081>.
- Kälin U., Lang N., Hug C., Gessler A., Wegner J.D. 2019. Defoliation estimation of forest trees from ground-level images, *Remote Sensing of Environment* 223: 143–153. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.021>.
- Kantola T., Vastaranta M., Yu X., Lyytikäinen-Saarenmaa P., Holopainen M., Talvitie M., Kaasalainen S., Solberg S., Hyypä J. 2010. Classification of Defoliated Trees Using Tree-Level Airborne Laser Scanning Data Combined with Aerial Images, *Remote Sensing* 2(12): 2665–2679. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs2122665>.
- Kardasz P., Doskocz J., Kardasz E., Adamczyk M., Cieniąła M. 2017. Aspekty użytkowania dronów w leśnictwie, *Acta Scientiarum Polonorum Administratio Locorum* 16.
- Lech P., Boczoń A., Hildebrand R., Kluziński L., Kowalska A., Małachowska J., Wawrzoniak J., Zajączkowski G. 2021. Stan zdrowotny lasów w Polsce w 2020 roku na podstawie badań monitoringowych. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary. s. 110–111.
- Mozgeris G., Augustaitis A. 2013. Estimating crown defoliation of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees using small format digital aerial images, *iForest* 6: 15–22. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifor0705-006>.
- Olson L.G. 2026. The application of intra-canopy photogrammetry for assessing crown health attributes in sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.), *Forestry* 99. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpag006>.
- Szymański P., Robaszniwicz A., Będkowski K., Brach M., Kwaśny Ł. 2014. Fotogrametryczny monitoring drzewostanu dębu bezszypułkowego (*Quercus petraea* Liebl.) w rezerwacie „Zimna Woda” w Rogowie, *Studia i Materiały CEPL w Rogowie*.
- Ziółkowska A. 2017. Drony wielozadaniowe. <https://media.sggw.pl/aktualnosci/376693/drony-wielozadaniowe> (dostęp 21.01.2025).