

Ocena wpływu turystyki i narciarstwa na stan kosorzewiny w rejonie Hali Gąsienicowej na podstawie zdjęć hiperspektralnych

Magdalena Zwijacz-Kozica¹, Tomasz Zwijacz-Kozica², Bogdan Zagajewski³

¹ EKO-KOZICA, Sienkiewicza 19/3, 34-500 Zakopane, e-mail: ekokozica@gmail.com

² Tatrzański Park Narodowy, Cbałubińskiego 42a, 34-500 Zakopane, e-mail: tzwijacz@tpn.pl

³ Katedra Geoinformatyki i Teledetekcji, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych, Uniwersytet Warszawski, ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa, e-mail: bogdan@uw.edu.pl

Słowa kluczowe: kosodrzewina, *Pinus mugo*, LAI, fAPAR, wpływ narciarstwa i turystyki na roślinność, Tatry

Keywords: dwarf pine, *Pinus mugo*, LAI, fAPAR, impact of tourism and skiing on vegetation, Tatra Mountains

Streszczenie

Celem pracy było stwierdzenie czy opisany za pomocą wskaźników biofizycznych stan kosodrzewiny wzdłuż szlaków turystycznych i nartostrad oraz na trasie narciarskiej różni się od stanu kosodrzewiny rosnącej z dala od terenów udostępnionych. Na mapy wartości LAI i fAPAR zbiorowisk kosodrzewiny nałożono mapy szlaków turystycznych i tras narciarskich w tym rejonie i dokonano klasyfikacji rozkładu wartości wskaźników biofizycznych, na trasach narciarskich, wzdłuż szlaków turystycznych oraz na obszarze z dala od szlaków turystycznych, tras narciarskich i nartostrad (powyżej 100 m). We wszystkich rozpatrywanych obszarach dominuje wartość LAI z przedziału od 3 do 4 m²/m² oraz fAPAR >0,9. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic pomiędzy rozkładami wartości wskaźników LAI i fAPAR kosodrzewiny rosnącej na obszarze trasy narciarskiej i wzdłuż szlaków turystycznych w porównaniu z kosodrzewiną rosnącą w odległości ponad 100 m od szlaków, tras narciarskich i nartostrad. Wykorzystane wskaźniki biofizyczne wskazują, że kosodrzewina w rejonie Hali Gąsienicowej ma bardzo dobrze rozwinięty aparat asymilacyjny i efektywnie wykorzystuje docierające do niej promieniowanie słoneczne, bez względu na to czy rośnie na trasie narciarskiej, w pobliżu szlaku turystycznego, czy też w znacznym oddaleniu od miejsc przeznaczonych dla turystyki i narciarstwa.

Wstęp

Kosodrzewina (*Pinus mugo* Turra) jest ważnym elementem krajobrazu górskiego. Dzięki swoim właściwościom pełni istotne funkcje ekologiczne w środowisku

wysokogórskim. Jej silnie rozwinięty system korzeniowy zabezpiecza stoki przed erozją, stabilizuje piargi i skalne osuwiska. Kosodrzewina wpływa także na utrzymanie korzystnych warunków termicznych gleby i ogranicza skutki wywołane wietrzeniem mrozowym. Odgrywa też istotną rolę w retencjonowaniu wody pochodzącej z opadów, a utrwalając pokrywę śnieżną ogranicza powstawanie lawin. Jako gatunek pionierski zasiedla tereny zniszczone przez osuwiska, lawiny oraz działalność człowieka (Fabijanowski, Dziewolski, 1996; Piękoś-Mirkowa, Mirek, 2003; Mróz, Perzanowska, 2004).

W przeszłości, głównym zagrożeniem dla zbiorowiska kosodrzewiny było pasterstwo, rzadziej eksploatacja igliwia (Myczkowski, Lesiński, 1974). Jeszcze w XX wieku nowe powierzchnie wypasowe, pozyskiwano przez wyrąb lub wypalanie znacznych obszarów porośniętych kosodrzewiną (Goetel, 1933). Od czasu likwidacji wypasu na terenach powyżej górnej granicy lasu, obserwuje się spontaniczną regenerację zbiorowisk kosodrzewiny na sztucznie powiększonych halach (Ciurzycki, 2004; Wrzesień, Zwijacz-Kozica, 2005). Za jedyne istotne zagrożenia dla tego gatunku obecnie uważane są turystyka i narciarstwo zjazdowe, zwłaszcza konieczność utrzymania starych tras zjazdowych lub budowa nowych (Skawiński, 1993; Skawiński, Krzan, 1996; Mróz, Perzanowska, 2004).

Rozległość i ukształtowanie obszarów wysokogórskich, trudny do nich dostęp oraz krótki okres wegetacyjny w znacznym stopniu ograniczają możliwość prowadzenia badań terenowych. Trudności występują szczególnie w piętrze kosodrzewiny, której zwarte zarośla praktycznie uniemożliwiają swobodne poruszanie się. Już w połowie XVII wieku pisano o niej: „*pochyłe drzewa które zowią kosodrzewiną bezdrożną, to jest nie mającą prześcia*” (Ślusarczyk, 2010). Prawdopodobnie właśnie z tego powodu nie prowadzono dotąd dokładniejszych badań nad stanem zarośli kosodrzewiny w Tatrach. Opisywano jedynie uszkodzenia krzewów tego gatunku powodowane przez narciarzy i maszyny uprawiające śnieg na trasach narciarskich (Skawiński, 1993; Skawiński,

Krzan, 1996; Guzik i in., 2002). Nie udało się również natrafić na informacje w literaturze na temat teledetekcyjnych badań stanu zarośli kosodrzewiny badaniach prowadzonych w innych rejonach występowania tego gatunku. Natomiast monitoring gatunków i siedlisk przyrodniczych ze szczególnym uwzględnieniem specjalnych obszarów ochrony siedlisk Natura 2000 prowadzony w ostatnich latach na zlecenie Głównego Inspektora Ochrony Środowiska, w przypadku zarośli kosodrzewiny, będących siedliskiem priorytetowym, ogranicza się do transektów prowadzonych wzdłuż szlaków turystycznych, starych ścieżek lub koryt potoków (Mróz, 2008).

Teledetekcja pozwala przezwyciężyć problem dostępności obszaru badań. Dzięki hiperspektralnym zdjęciom lotniczym rejonu Hali Gąsienicowej wykonanym w 2002 możliwe było sporządzenie dla zbiorowisk kosodrzewiny rosnących na tym obszarze map wartości

spektralnych wskaźników roślinnych LAI (ryc. 1) i fAPAR (ryc. 2) (Zwijacz-Kozica, 2010). Wskaźniki biofizyczne informują o kondycji roślin.

Powierzchnia projekcyjna liści/igieł – LAI (*ang. leaf area index*) jest definiowana jako połowa całkowitej powierzchni liści na jednostkę terenu lub powierzchnia igieł rzutowana na płaszczyznę na jednostkę terenu (Chen, Black, 1992; Myneni i in., 2002; Asner i in., 2003). LAI jest wielkością bezwymiarową opisaną wzorem (Scurlock i in., 2001):

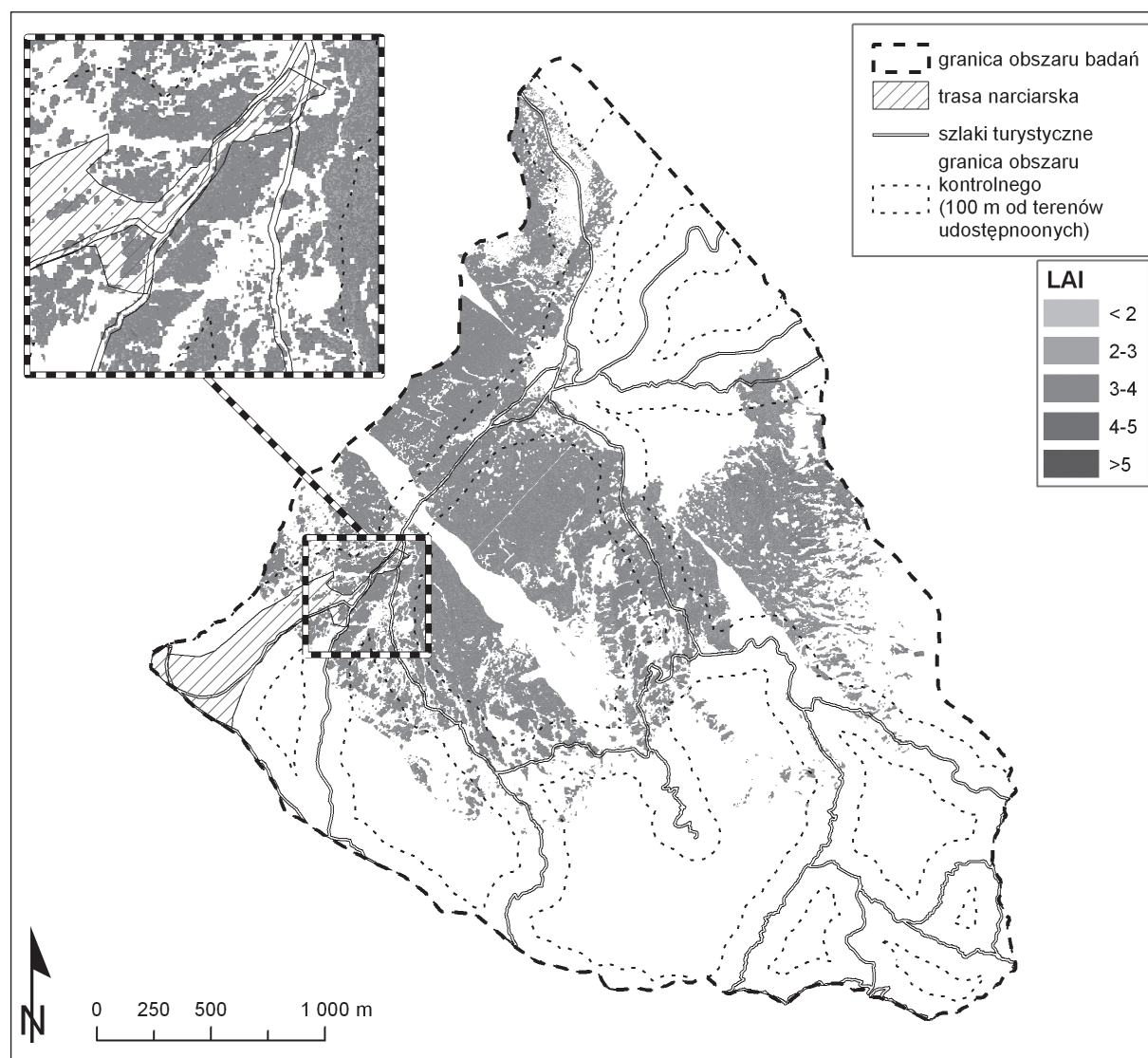
$$LAI = \frac{s}{G} \text{ [m}^2\text{m}^{-2}\text{]} \quad (1)$$

gdzie:

s – funkcjonalna powierzchnia liści

G – jednostka powierzchni terenu

LAI należy do grupy podstawowych miar opisujących strukturę roślinności oraz do kluczowych zmiennych



Ryc. 1. Szlaki turystyczne, trasa narciarska oraz obszar oddalony od terenów udostępnionych o 100 m na tle przestrzennego rozkładu wartości LAI kosodrzewiny (nie zacieniowane nie podlegały analizie – brak kosodrzewiny lub brak danych hiperspektralnych)

Fig. 1. Tourist trails, ski trail and the area located 100 m away from places accessible to tourists on the background of spatial distribution of dwarf pine LAI values

w większości modeli produktywności ekosystemów, modelowaniu cykli klimatycznych, hydrologicznych, biogeochemicznych i ekologicznych (Chen i in., 1999; Buermann i in., 2001). Wywiera także wpływ na przebieg i efektywność procesów takich jak ewapotranspiracja, transpiracja, fotosynteza oraz warunkuje produkcję pierwotną (Kumar i in., 2001; Darvishzadeh i in., 2006). Charakteryzuje przemiany roślinności w skali globalnej, jak i lokalnej, ponieważ reaguje szybko na zmieniający się klimat i na obecność czynników wywołujących stres u roślin (Stenberg i in., 2004). Im wyższa wartość LAI, tym więcej aparatu asymilacyjnego posiadają rośliny.

Produktywność – fAPAR (*ang. fraction of absorbed photosynthetically active radiation*) – frakcja względna energii akumulowanej w procesie fotosyntezy (APAR), nazywana także współczynnikiem produktywności, określa, jaka część PAR (*ang. photosynthetically active ra-*

diation), czyli promieniowania w zakresie 400–700 nm, która dotarła do rośliny, została przez nią pobrana i wykorzystana do przeprowadzenia procesu fotosyntezy. Wskaźnik fAPAR można wyrazić wzorem (Gower i in., 1999):

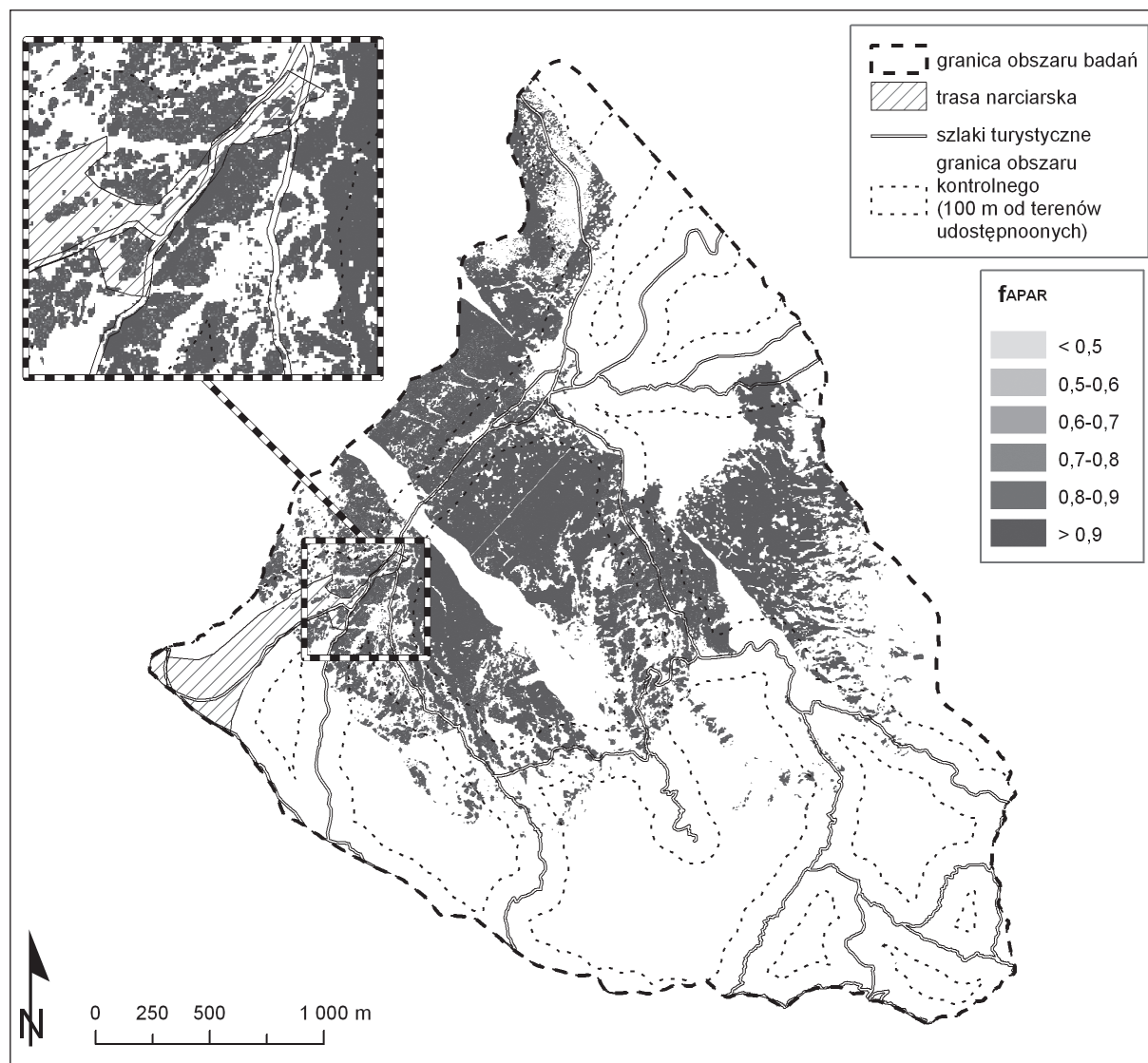
$$fAPAR = APAR/PAR_0 \quad (2)$$

gdzie:

$$APAR = (PAR_0 \downarrow + PAR_s \uparrow) - (PAR_t \downarrow + PAR_c \uparrow) \quad (3)$$

a PAR_0 – promieniowanie w zakresie aktywnym fotosyntetycznie, bezpośrednio docierające do roślin, PAR_c – promieniowanie odbite przez rośliny, PAR_t – promieniowanie przechodzące przez warstwę roślin i PAR_s – promieniowanie odbite od podłoża (Epiphanyo, Huete, 1995):

fAPAR pozwala ocenić sprawność aparatu asymilacyjnego, a co za tym idzie stan całej rośliny (Daughtry i in., 1992). Osiąga wartości od 0 (roślina w ogóle nie



Ryc. 2. Szlaki turystyczne, trasa narciarska oraz obszar oddalony od terenów udostępnionych o 100 m na tle przestrzennego rozkładu wartości fAPAR kosodrzewiny (nie zacienione nie podlegały analizie – brak kosodrzewiny lub brak danych hiperspektralnych)

Fig. 2. Tourist trails, the ski trail and the area located 100 m away from places accessible to tourists on the background of spatial distribution of dwarf pine fAPAR values

wykorzystuje docierającego do niej promieniowania) do 1 (roślina wykorzystuje całe docierające do niej promieniowanie). fAPAR ma charakter względny i dzięki temu jest wykorzystywana do porównań stanu różnych typów roślinności, okresowych zmian kondycji roślin, śledzenia długości okresu wegetacyjnego, przebiegu faz fenologicznych oraz analiz zjawisk takich jak susze czy degradacja ziemi (Gobron i in., 2008).

Celem pracy było stwierdzenie czy opisany za pomocą wskaźników spektralnych stan kosodrzewiny wzdłuż szlaków turystycznych i nartostrad oraz na trasie narciarskiej różni się od stanu kosodrzewiny rosnącej z dala od terenów udostępnionych.

Metody

Na mapy wartości LAI i fAPAR zbiorowisk kosodrzewiny rosnącej na obszarze Hali Gąsienicowej (Zwijacz-Kozica, w druku) nałożono mapy szlaków turystycznych i tras narciarskich w tym rejonie (ryc. 1 i 2). Na tej podstawie dokonano klasyfikacji rozkładu wartości wskaźników spektralnych:

- na trasach narciarskich, gdzie ma miejsce bezpośrednie mechaniczne niszczenie pędów kosodrzewiny przez ratraki oraz ślizgi nart,

- wzdłuż szlaków turystycznych (do 5 m od szlaku, co odpowiada strefie objętej przez TPN umowami na sprzątanie szlaków turystycznych),

- na obszarze z dala od szlaków turystycznych, tras narciarskich i nartostrad (powyżej 100 m), gdzie jest bardzo małe prawdopodobieństwo penetracji przez turystów zbaczających ze znakowanych szlaków turystycznych.

Następnie za pomocą testu χ^2 porównano rozkład wartości LAI i fAPAR dla kosodrzewiny na obszarach położonych z dala od szlaków turystycznych, nartostrad i trasy narciarskiej z rozkładami wartościami LAI i fAPAR w obrębie trasy narciarskiej oraz w bliskim sąsiedztwie szlaków i nartostrad.

Wyniki

We wszystkich rozpatrywanych miejscach dominuje wartość LAI z przedziału od 3 do 4 m^2/m^2 (ryc. 3), która charakteryzuje większość powierzchni obszaru badań (>77%) oraz fAPAR > 0,9 (ryc. 4) – także przeważające w rejonie Hali Gąsienicowej (> 90% powierzchni obszaru badań).

Test χ^2 nie wykazał istotnych statystycznie różnic pomiędzy rozkładami wartości wskaźników LAI i fAPAR kosodrzewiny rosnącej na obszarze trasy narciarskiej i wzdłuż szlaków turystycznych w porównaniu z kosodrzewiną rosnącą w odległości ponad 100 m od szlaków, tras narciarskich i nartostrad (Tab. 1).

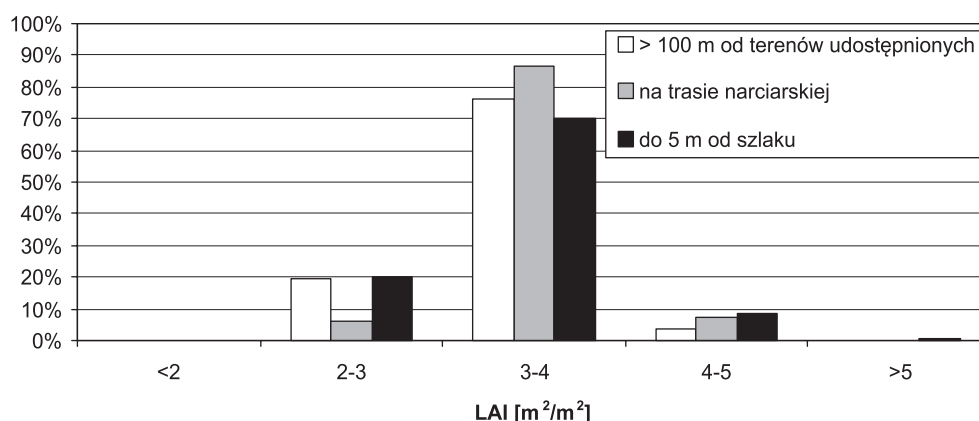
Tabela 1. Wyniki testu χ^2

Table 1. Results of χ^2 test

	na trasie narciarskiej vs. < 100 m od terenów udostępnionych	do 5 m od szlaku vs. < 100 m od terenów udostępnionych
fAPAR	$\chi^2 = 0,0864$, df = 5, p < 0,999887	$\chi^2 = 0,0301$, df = 5, p < 0,999992
LAI	$\chi^2 = 0,1443$, df = 4, p < 0,997518	$\chi^2 = 0,0630$, df = 4, p < 0,999514

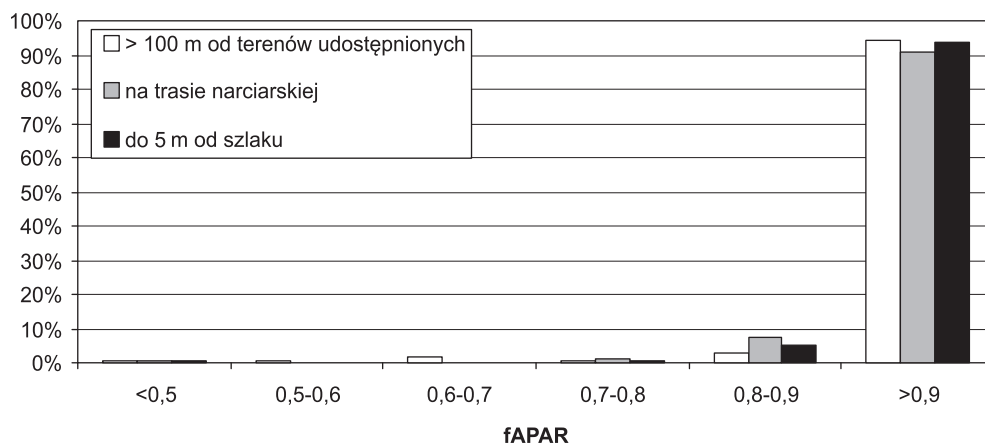
Podsumowane wyników i wnioski

Wskaźniki spektralne wskazują, że kosodrzewina w rejonie Hali Gąsienicowej ma bardzo dobrze rozwinięty aparat asymilacyjny i efektywnie wykorzystuje docierające do niej promieniowanie słoneczne, bez względu na to czy rośnie na trasie narciarskiej, w pobliżu szlaku turystycznego, czy też w znacznym oddaleniu od miejsc przeznaczonych dla turystyki i narciarstwa. Stan kosodrzewiny na całym obszarze objętym zdjęciem hiperspektralnym w 2002 roku należy uznać za bardzo dobry (Zwijacz-Kozica, w druku). Wartości fAPAR i LAI otrzymane dla kosodrzewiny są korzystniejsze od wartości tych wskaźni-



Ryc. 3. Udział wartości LAI w poszczególnych klasach wartości z dala od terenów udostępnionych, na trasie narciarskiej i w bliskim sąsiedztwie szlaków turystycznych

Fig. 3. Percentage of dwarf pine LAI class values within area not accessible to tourism, within ski trail and in the vicinity of tourist trails



Ryc. 4. Udział wartości fAPAR w poszczególnych klasach wartości z dala od terenów udostępnionych, na trasie narciarskiej i w bliskim sąsiedztwie szlaków turystycznych

Fig. 4. Percentage of dwarf pine fAPAR class values within area not accessible to tourism, within ski trail and in the vicinity of tourist trails

ków otrzymanych dla większości rosnących w sąsiedztwie roślin hal alpejskich. Jedynie borówka czarna *Vaccinium myrtillus* wykazała nieco lepszą kondycję osiągając średnią wartość fAPAR 0,95 przy średniej wartości LAI – 5,10 m²/m² dla tego gatunku (Zagajewski i in., 2005).

Opisywane w literaturze uszkodzenia pędów kosodrzewiny powodowane przez ruch turystyczny i narciarski (Skawiński, 1993; Skawiński, Krzan, 1996; Guzik i in., 2002; Mróz, Perzanowska, 2004) nie są istotnym zagrożeniem dla żywotności zbiorowisk tego gatunku jako całości. Choć nie rzadko mają one drastyczny wygląd, obejmują zwykle niewielkie powierzchnie i co najwyżej eliminują pojedyncze krzewy. Uszkodzenia te nie powstrzymują jednak stopniowego zarastania tras narciarskich (Guzik i in., 2002). Podobnie uszkodzenia pędów kosodrzewiny przez turystów poruszających się wzdłuż szlaków pieszych nie powstrzymują tego krzewu przed zarastaniem światła szlaku. Aby zapewnić drożność ciągów szlaków, konieczne jest ich przecinanie co 5–10 lat. Przykładowo szlak z Hali Gąsienicowej do Czarnego Stawu Gąsienicowego przecinany był ostatnio w latach 2001 i 2008. Możliwe także, że drobne uszkodzenia polegające na przycinaniu lub obłamywaniu końcówek pędów działają wręcz stymulująco na rozrost krzewów, powodując ich zagęszczanie, a co za tym idzie zwiększanie ilości aparatu asymilacyjnego. Za istotne zagrożenie dla zbiorowisk tego gatunku należy więc uznać budowę nowych tras narciarskich lub inne przedsięwzięcia połączone z usuwaniem krzewów na dużych powierzchniach, na przykład dokonane w 2008 roku poszerzenie szlaku w górnej części Doliny Rostoki.

Evaluation of the tourist and skiing impact on dwarf pine bushes in Hala Gąsienicowa, based on hyperspectral aerial images

This work's objective was to evaluate whether dwarf pine condition along tourist trails, ski routes and on the ski trail, expressed in values of vegetation biophysical

parameters differs from dwarf pine shrubs that grow far away from area accessible to tourists and skiers. Maps of LAI and fAPAR were overlaid with map of tourist trails and ski trail and classified according to values of vegetation biophysical parameters within tourist trails, ski trails and ski routes (more than 100 m). Within all analyzed areas LAI values concentrate around 3 to 4 m²/m² and fAPAR > 0.9. No statistically significant differences between values of LAI and fAPAR describing dwarf pine growing by the tourist trails in comparison to dwarf pine growing far away from tourist and ski trails were observed. Vegetation biophysical parameters show that dwarf pine growing in the area of Gąsienicowa Valley has well developed assimilatory apparatus and effectively uses photosynthetically active radiation regardless of distance to tourist and ski trails.

Literatura

- Asner G.P., Scurlock J.M.O., Hicke J.A., 2003. Global synthesis of leaf area index observations: implications for ecological and remote sensing studies, *Global Ecology & Biogeography*, 12, s. 191–205.
- Buermann W., Dong J., Zeng X., Myneni R.B., Dickinson R.E., 2001. Evaluation of the utility of satellite-based vegetation leaf area index data for climate simulations, *Journal of Climate*, 14, s. 3536–3550.
- Chen J.M., Black T.A., 1992. Defining leaf area index for non-flat leaves, *Plant Cell Environment*, 15, s. 421–429.
- Chen J.M., Leblanc S.G., Miller J.R., Freemantle J., Loebel S.E., Walthall C.L., Inanen K.A., White H.P., 1999. Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI) used for mapping biophysical parameters of boreal forests, *Journal of Geophysical Research*, 104, D22, s. 27945–27958.
- Ciurzycki W., 2004. Struktura przestrzenna naturalnych odnowień świerkowych na gómoreglowych polanach popasterskich w Tatrach Polskich, *Sylwan*, 7, s. 20–30.

- Darvishzadeh R., Atzberger C., Skidmore A.K., 2006. Hyperspectral vegetation indices for estimation of leaf area index. ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands, 8–11 May 2006 [Internet: http://www.itc.nl/isprsc7/symposium/proceedings/TS16_5.pdf 27-3-2007].
- Daughtry C.S.T., Gallo K.P., Goward S.N., Prince S.D., Kustas W.P., 1992. Spectral estimates of absorbed radiation and phytomass production in corn and soybean canopies. *Remote Sensing of Environment*, 39, s. 141–152.
- Epiphanyo J.C.N., Huete A.R., 1995. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfalfa, *Remote Sensing of Environment*, 51, s. 351–360.
- Fabijanowski J., Dziewolski J., 1996. *Gospodarka leśna*. [w:] Mirek, Z., (red.). *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*, TPN, Kraków – Zakopane, s. 675–696.
- Gobron N., Pinty B., Auzanedat O., Taberner M., Faber O., Mélin F., Lavergne T., Robustelli M., Snoeij P., 2008. Uncertainty estimates for the fAPAR operational products derived from MERIS – Impact of top-of-atmosphere radiance uncertainties and validation with field data. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1871–1883.
- Goetel W., 1933, *Utworzenie pogranicznych Parków Narodowych*, *Wierchy*, 11: 168–195.
- Gower S.T., Kucharik C.J., Norman J.M., 1999. Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and net primary production of terrestrial ecosystems, *Remote Sensing of Environment*, 70, s. 29–51.
- Guzik M., Skawiński P., Wężyk P., 2002. Oddziaływanie narciarstwa zjazdowego na szatę roślinną Doliny Goryczkowej w Tatrach. [w:] Partyka J. (red.), *Użytkowanie turystyczne Parków Narodowych, Ruch turystyczny – Zagospodarowanie – Konflikty – Zagrożenia, Ojców 2002*.
- Kumar L., Schmidt K., Dury S., Skidmore A., 2001. Imaging spectrometry and vegetation science. [w:] van der Meer F., de Jong S.M. (red.), *Hyperspectral Remote Sensing: Basic Principles and Perspective Applications*, Dordrecht, Springer 2001 (Remote Sensing and Digital Image Processing, Vol. 4), s. 111–155.
- Mróz W., 2008. 4070* Zarośla kosodrzewiny (*Pinetum mugo*), *Metodyka monitoringu – przewodniki metodyczne, Monitoring gatunków i siedlisk przyrodniczych ze szczególnym uwzględnieniem specjalnych obszarów ochrony siedlisk Natura 2000, GIOŚ*.
- Mróz W., Perzanowska J., 2004. Zarośla kosodrzewiny (*Pinetum mugo*). [w:] J. Herbich (red.), *Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000 – poradnik metodyczny. Tom 3. Murawy, łąki, ziołorośla, wrzosowiska, zarośla*, Wyd. Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 54–62.
- Myczkowski S., Lesiński J., 1974. Rozsiedlenie rodzimych ratunków drzew tatrzańskich, *Stud. Ośr. Dok. Fizjogr.*, III, s. 13–70.
- Myneni R.B., Hoffman S., Knyazikhin Y., Privette J.L., Glassy J., Tian Y., Wang Y., Song X., Zhang Y., Smith G.R., Lotsch A., Friedl M., Morissette J.T., Votava P., Nemani R.R., Running S.W., 2002. Global products of vegetation leaf area and fraction absorbed PAR from year one of MODIS data. *Remote Sensing of Environment*, 83, s. 214–231.
- Piękoś-Mirkowa H., Mirek Z., 2003. *Flora Polski. Atlas roślin chronionych*. Multico, Oficyna Wydawnicza, Warszawa.
- Scurlock J.M.O., Asner G.P., Gower S.T., 2001. *Worldwide Historical Estimates of Leaf Area Index, 1932–2000*, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
- Skawiński P., 1993. Oddziaływania człowieka na przyrodę kopuły Kasprowego Wierchu oraz Doliny Goryczkowej w Tatrach. [w:] Cichocki, W., (red.). *Ochrona Tatr w obliczu zagrożeń*, Muzeum Tatrzańskie, TPN, Zakopane, s. 197–226.
- Skawiński P., Krzan Z., 1996. *Narciarstwo*, [w:] Mirek, Z., (red.). *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego*, TPN, Kraków – Zakopane, s. 697–594.
- Stenberg P., Rautiainen M., Manninen T., Voipio P., Smolander H., 2004. Reduced simple ratio better than NDVI for estimating LAI in Finnish pine and spruce stands, *Silva Fennica*, 38, 1, s. 3–14.
- Ślusarczyk J.M., 2010. Pierwszy w literaturze polskiej opis pięter roślinnych w Tatrach, *Wierchy* 74, s. 191–193.
- Wrzesień M., Zwijacz-Kozica T., 2007. Wykorzystanie metody powtórzonych fotografii do ilościowej analizy zmian pokrycia terenu na przykładzie Hali Gąsienicowej, *Studia Naturae*, 54, I, s. 265–273.
- Zagajewski B., Folbrier A., Kozłowska A., Sobczak M., Wrzesień M., 2005. Zintegrowane pomiary roślinności wysokogórskiej, *Teledetekcja Środowiska*, 36, s. 61–68.
- Zwijacz-Kozica M., 2010. Zróżnicowanie kosodrzewiny w Tatrach, w świetle badań teledetekcyjnych, *Teledetekcja Środowiska*, 44.