

Gabriel STACHURA

UNIwersytet Jagielloński, Wydział Geografii i Geologii

ZMIENNOŚĆ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH POKRYWY ŚNIEŻNEJ NA HALI GAŚNIENICOWEJ W KONTEKŚCIE ZAGROŻENIA LAWINOWEGO**VARIABILITY OF PHYSICAL PROPERTIES OF SNOW COVER AT HALA GAŚNIENICOWA IN TERMS OF AVALANCHE DANGER****Wstęp**

Pokrywa śnieżna jest przedmiotem zainteresowania naukowców wielu dziedzin, m.in. meteorologii, hydrologii czy botaniki. Ze względu na warunki klimatyczne, głównie dłuższy czas zalegania pokrywy śnieżnej, jej znaczenie dla środowiska jest dużo większe w obszarach górskich. To na tych regionach skupia się współcześnie większość badań niwalnych. Jednym z ich najważniejszych celów jest lepsze poznanie właściwości pokrywy śnieżnej oraz mechanizmów wpływających na zagrożenie lawinowe w górach.

Najważniejszymi metodami oceny stabilności pokrywy śnieżnej są obserwacje schodzących lawin oraz badanie właściwości pokrywy śnieżnej w profilu, połączone z wykonaniem testu poślizgu (niem. *rutschblock test*) lub testu sprężystości (Schweizer, Wiesinger 2001). Profile śniegowe są zatem ważnym źródłem danych, wspomagającym pośrednią metodą określenia zagrożenia lawinowego na podstawie czynników meteorologicznych. Należy mieć jednak na uwadze, że są one reprezentatywne dla pewnego ograniczonego obszaru (Schweizer, Wiesinger 2001).

Właściwości fizyczne poszczególnych warstw pokrywy śnieżnej są pochodną wzajemnie od siebie zależnych czynników meteorologicznych oraz czynników terenowych (Marasek 2003). Do elementów meteorologicznych mogących wpływać na powstawanie lawin zalicza się opady atmosferyczne, temperaturę powietrza, prędkość i kierunek wiatru oraz usłonecznienie. Czynniki terenowe mają z kolei charakter przestrzenny. Należą do nich: orientacja względem dominującego kierunku wiatru, nachylenie oraz ekspozycja stoku, ukształtowanie terenu, charakter podłoża i pokrycie szatą roślinną. Ponieważ w niniejszym artykule analizowane są dane z jednego punktu pomiarowego, czynniki przestrzenne pozostają niezmiennie. Omówione zostaną wyłącznie relacje między czynnikami meteorologicznymi a tymi parametrami pokrywy śnieżnej, których

przebieg w ciągu sezonu najlepiej odzwierciedla przebieg, ogłaszanego przez Tatrzańskie Ochotnicze Pogotowie Ratunkowe (TOPR), stopnia zagrożenia lawinowego.

Choć pierwsze publikacje na temat obserwacji lawin śnieżnych pojawiły się w literaturze polskiej już na początku XX wieku, dopiero w latach 60. rozpoczęto systematyczne badania pokrywy śnieżnej. Realizowane je w Stacji Badań Niwalnych na Hali Gąsienicowej (Kłapowa 1980; Paryscy 1995). Metodyka tych badań oraz stosowana w nich klasyfikacja śniegu została wypracowana przez Chomicza (1962). Analiza prowadzonych w latach 60. przez Kłapową szczegółowych badań pokrywy śnieżnej do dziś stanowi najważniejsze kompendium wiedzy w literaturze polskiej w aspekcie przemian zachodzących w pokrywie śnieżnej pod wpływem warunków atmosferycznych. W 2007 roku ukazało się podsumowanie warunków śniegowych w Tatrach w sezonie 2004/2005 (Fiema i in. 2007), jednak zamieszczone tam dane nie zostały poddane szczegółowej analizie. Mościcki i Kędzia (2001), dokonując pomiarów temperatury spągu pokrywy śnieżnej w Koziej Dolince, dowiedli występowania wieloletniej zmarzliny w gruncie. Problematyka lawin była poruszana także w kontekście zastosowania współczesnych technologii (Karzyński, Nodzyński 2005; Chrustek 2013). W ujęciu statystycznym o lawinach w Tatrach Polskich pisali Fiema i Nodzyński (2013). Gądek i in. (2016) dokonali estymacji zagrożenia lawinowego dla ostatnich dziewięćdziesięciu lat na podstawie historycznych danych meteorologicznych, osiągając dokładność nawet ponad 70%. O warunkach powstawania lawin pisali w popularnonaukowych publikacjach ratownicy TOPR – Marasek (2003) oraz Kacperek (2005).

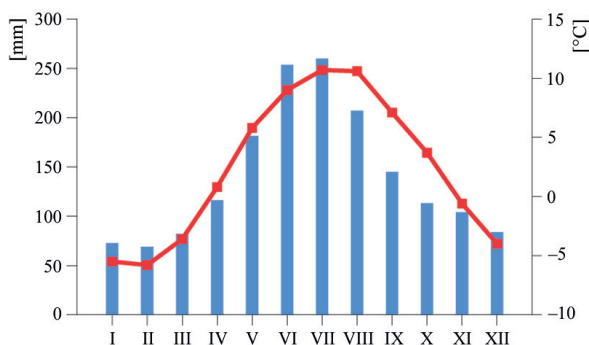
Dużo bogatsza od polskiej jest literatura zagraniczna. Do fundamentalnych dzieł dotyczących właściwości fizycznych śniegu należą podręcznik autorstwa Pomeroya i Bruna (2004) oraz Armstronga i Bruna (2010). W Europie jednym z najważniejszych ośrodków badań śniegowych jest Szwajcarski Instytut Federalny Badań Śniegowych i Lawinowych (SLF). Powstało w nim wiele publikacji związanych z interpretacją profili śnieżnych w kontekście zagrożenia lawinowego (Schweizer, Jamieson 2003; Schweizer i in. 2003). Stworzono tam także model strukturalny pokrywy śnieżnej, w celu dokładniejszego określania stabilności pokrywy śnieżnej, na podstawie którego powstało wiele publikacji (Lehning i in. 1999). Badano także wpływ poszczególnych elementów meteorologicznych na wybrane parametry pokrywy śnieżnej, np. na gęstość śniegu (Meløysund i in. 2007). Geldsetzer i Jamieson (2000) dokonali estymacji gęstości danej warstwy na podstawie jej twardości oraz średnicy ziaren. Mechanizmy wpływające na zwiększone ryzyko zagrożenia lawinowego zostały wyczerpująco opisane w austriackim popularnonaukowym poradniku Kurzedera i Feista (2013).

Liczne publikacje z dziedziny badań niwalnych nadal nie wyczerpują jednak tematyki określania i prognozowania zagrożenia lawinowego. Stąd też celem tego opracowania jest dokładniejsze poznanie oraz weryfikacja znanych już mechanizmów metamorfozy śniegu, w szczególności w odniesieniu do stabilności pokrywy śnieżnej, a także znalezienie takiego parametru pokrywy śnieżnej, który najlepiej odzwierciedla zmienność zagrożenia lawinowego w zależności od czynników meteorologicznych.

Obszar badań

Stacja Badań Niwalnych IMGW-PIB położona jest w północnej części Doliny Gąsienicowej stanowiącej górny fragment Doliny Suchej Wody Gąsienicowej. Dolina ta jest jedną z dolin walnych Tatr, a jej przebieg zorientowany jest w kierunku północnowschodnim (Błażejczyk i in. 2013). Jej osią, od przełęczy Liliowe aż do wylotu nieopodal Brzeziny, przebiega umowna granica między dwoma głównymi mezoregionami Tatr Polskich – Tatrami Zachodnimi i Wysokimi (Kondracki 2011; Balon i in. 2015). Funkcjonująca tu stacja meteorologiczna IMGW-PIB jest najstarszym górskim posterunkiem w Polsce. Pomiary prowadzi się tu, z niewielkimi przerwami, od 1913 roku (Kozłowska-Szczęsna 2013; Limanówka 2013). Do niedawna stacja miała status stacji klimatologicznej III rzędu, z rozszerzoną do pięciu liczbą obserwacji w ciągu doby; 1 stycznia 2019 r. włączono ją do grupy stacji II rzędu (półsynoptycznych) (inf. ustna). Budynek stacji jest jednocześnie siedzibą Stacji Badawczej Instytutu Geografii i Zagospodarowania Przestrzennego PAN.

Stacja położona jest na wysokości 1520 m n.p.m., tuż ponad górną granicą lasu. Średnia roczna temperatura powietrza na Hali Gąsienicowej z lat 1951-2010 wynosi $+2,4^{\circ}\text{C}$ (Limanówka i in. 2013). Stacja leży zatem w piętrze chłodnym, którego górna granica wyznaczona jest przebiegiem izotermy rocznej $+2^{\circ}\text{C}$ (Hess 1965). Najchłodniejszym miesiącem jest luty ($-5,8^{\circ}\text{C}$), zaś najcieplejszym lipiec ($+10,7^{\circ}\text{C}$). Tylko dla dwóch miesięcy (lipiec i sierpień) średnia miesięczna temperatura przekracza $+10^{\circ}\text{C}$ (rys. 1). Hala Gąsienicowa charakteryzuje się także wysokimi rocznymi sumami opadów. W latach 1927-2012 wynosiły one średnio 1666 mm, wahając się w szerokim zakresie od 1043,5 mm do 2626 mm (Limanówka 2013). W przebiegu rocznym, maksimum opadów przypada najczęściej na lipiec lub czerwiec (rys. 1), co jest typowe dla obszarów górskich Europy Środkowej (Trepiańska 2002). Opady występują średnio przez 217 dni w roku, z czego około 55% z nich to opady w postaci stałej (Ustrnul i in. 2015). Średnia liczba dni z pokrywą śnieżną na Hali Gąsienicowej w latach 1927-2012 wynosiła 186 dni. Trwała pokrywa śnieżna tworzy się przeciętnie w trzeciej dekadzie października, zanika zaś w pierwszej dekadzie maja. Spośród 186 dni z pokrywą śnieżną, aż 139 dni stanowi pokrywa śnieżna



Rys. 1. Klimatogram dla stacji Hala Gąsienicowa

Fig. 1. Climograph for Hala Gąsienicowa station

o wysokości powyżej 20 cm, zaś 110 dni – o wysokości powyżej 50 cm. Warto dodać, że pokrywa śnieżna może pojawić się o każdej porze roku, np. 8 lipca 1984 r. warstwa śniegu wyniosła 8 cm (Limanówka 2013).

Dane źródłowe i metody

Szczegółowe badanie pokrywy śnieżnej wykonuje się zgodnie ze standardem Międzynarodowej Komisji Śniegu i Lodu UNESCO (Fierz i in. 2009). Składa się na nie pomiar sondą śniegową (tzw. sondowanie przez ubijanie) oraz opis profilu stratygraficznego, który polega na wydzieleniu w nim warstw oraz określeniu w każdej z nich następujących parametrów: formy kryształów i gatunku śniegu, średnicy ziaren, twardości, wilgotności, gęstości oraz kohezji. Ponadto, niezależnie od uwarstwienia, w równych odstępach co 10 lub 20 cm wykonuje się pomiar temperatury śniegu (Karzyński, Kotlarczyk 2005). Ocena niektórych parametrów jest czynnością subiektywną opartą na wizualnej ocenie lub odczuciach obserwatora (np. wydzielenie warstw, twardość, wilgotność). Przykładem właściwości fizycznych mierzonych za pomocą aparatury pomiarowej jest gęstość oraz kohezja. Wykorzystanie sprzętu niesie ze sobą jednak ograniczenia ze względu na jego rozmiar – wykonanie pomiaru gęstości możliwe jest dla warstwy o miąższości nie mniejszej niż 8 cm (dla kohezji jest to 6 cm) (Karzyński, Kotlarczyk 2005).

W pracy wykorzystano zbiór 141 profili pokrywy śnieżnej wykonanych na Stacji Badań Niwalnych IMGW na Hali Gąsienicowej w okresie dziesięciolecia 2007/2008 – 2016/2017 wraz z dobowymi danymi meteorologicznymi z tego okresu. Do analizy wykorzystano wszystkie dostępne materiały. Profile wykonywane były raz w tygodniu pod warunkiem istnienia wystarczającej pokrywy śnieżnej na poletku.

Tabela 1. Objaśnienia form kryształów (po lewej) oraz skali twardości (po prawej)
(Karzyński, Kotlarczyk 2005; Fierz i in. 2009)

Table 1. Explanation of forms of grains (on the left) and hardness scale (on the right)
(Karzyński, Kotlarczyk 2005; Fierz et al. 2009)

Oznaczenie	Nazwa
1	śnieg świeży
2	śnieg w pierwszym stadium metamorfozy
3	śnieg ziarnisty o zaokrąglonych kształtach
4	śnieg gruboziarnisty o zaostzonych krawędziach
5	szron wglębny
6	duże kryształy powstałe wskutek rekrytalizacji
7	lód
8	szron powierzchniowy

Wartość	Charakterystyka śniegu
1	bardzo miękki
2	miękki
3	średnio twardy
4	twardy
5	bardzo twardy

Na podstawie danych śniegowych obliczono parametry statystyczne (np. maksymalna wartość gradientu temperatury w pokrywie śnieżnej, procentowa zawartość w pokrywie śniegu drobnoziarnistego itp.). Skupiono się szczególnie na parametrach obliczanych na podstawie miar zmienności (np. odchylenie standardowe średnicy ziaren, rozstęp gęstości), ponieważ zróżnicowanie właściwości warstw pokrywy śnieżnej jest istotą powstawania lawin deskowych stanowiących przeważającą część lawin w Tatrach (Schweizer, Jamieson 2003; Fiema, Nodzyński 2013). Ponadto, dzięki uprzejmości TOPR, uzyskano informacje o stopniu zagrożenia lawinowego, obowiązującym każdego dnia dla sezonów od 2009/2010 do 2016/2017. Zagrożenie ogłaszane jest w 5-stopniowej skali (od 1 do 5), przy czym najwyższym jest stopień 5. Ze względu na to, że komunikat lawinowy ogłaszany jest dwukrotnie w ciągu dnia (o godz. 8:00 oraz o 17:00), przyjęto że komunikat z godz. 8:00 jest obowiązujący dla całej doby, zaś komunikat z godz. 17:00 dotyczy już doby następnej. W tabeli 1 znajdują się objaśnienia skali analizowanych w dalszej części artykułu parametrów pokrywy śnieżnej – formy kryształów oraz twardości.

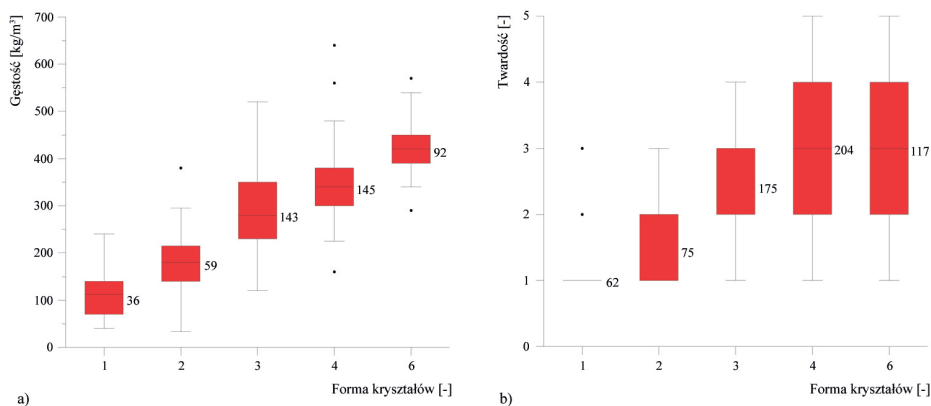
Wyniki i dyskusja

W celu odniesienia rozważanych parametrów do przemian zachodzących w pokrywie śnieżnej, na wstępie przeanalizowano zależność gęstości i twardości warstwy względem formy kryształów (rys. 2). Kłapowa (1980) stwierdziła, że gęstość śniegu jest właściwym wskaźnikiem stopnia metamorfozy pokrywy śnieżnej. Uzasadnieniem tego jest wyraźna i w przybliżeniu liniowa zależność między gęstością a formą kryształów (rys. 2a). Biorąc pod uwagę przedział pomiędzy pierwszym a trzecim kwartylem, niemal każda forma kryształów cechuje się unikatowym przedziałem gęstości. Najbardziej zbliżone pod tym względem są do siebie formy 3 i 4, a zatem śnieg ziarnisty o zaokrąglonych kształtach oraz śnieg gruboziarnisty o zaokrąglonych krawędziach. Są to ostatnie etapy metamorfozy suchej – gęstość śniegu osiąga wówczas duże wartości wskutek długotrwałego zalegania oraz kompresji warstw nadległych. Wyróżniający się dla formy 3 długi wąs górny, wskazuje na częste przypadki występowania odwilży przerywającej cykl metamorfozy suchej. Gatunek 6 to śnieg zalegający w warunkach odwilży i zawierający wodę w stanie ciekłym. Kłapowa (1980) za graniczną wartość gęstości wyznaczającą metamorfizm tajania przyjęła 400 kg/m^3 . Na podstawie wykresu możemy stwierdzić, że jest ona jak najbardziej słuszna, ponieważ zbliżona jest do wartości pierwszego kwartyla dla tej formy.

Rozważając zależność twardości od formy kryształów (rys. 2b), należy mieć na uwadze fakt, że obie zmienne przyjmują wyłącznie wartości całkowite, stąd regularny kształt wykresu. Łatwo zauważyć, że wraz ze stopniem przeobrażenia śniegu, wzrasta rozrzut twardości, przy czym trend ten jest najbardziej widoczny dla górnego wąsa, tj. maksimum dla każdej z form. Minimum jest z kolei zupełnie nieodróżniane. A zatem warstwy o najmniejszej twardości mogą pojawić się na każdym etapie metamorfozy śniegu. Największy rozrzut twardości cechuje warstwy w końcowych fazach metamor-

fozy (formy 4 i 6). W rezultacie można wysnuć wniosek, że największe zróżnicowanie twardości warstw może wystąpić w okresie późnozimowym i wiosennym.

Następnie analizie poddano sezonowy przebieg stopnia zagrożenia lawinowego oraz rozstęp gęstości i twardości. Za rozstęp gęstości (twardości) uznano różnicę między największą a najmniejszą gęstością (twardością) warstwy w profilu, przy czym w przypadku lodu przyjęto gęstość (twardość) nieokreśloną. Podstawowym problemem przy tego typu porównaniu jest znacząca różnica rozdzielczości obu zbiorów danych. Zagrożenie lawinowe oceniane jest zasadniczo dwukrotnie w ciągu doby, zaś badania śniegowe wykonuje się na ogół raz w tygodniu, pod warunkiem istnienia wystarczającej pokrywy śniegu na poletku. Stąd też nie dokonano obliczeń współczynnika korelacji, opierając się na wizualnej analizie podobieństwa przebiegu omawianych wielkości. Do prezentacji wyników wybrano trzy sezony, w których szczegółowe badania pokrywy śnieżnej wykonywane były w miarę regularnie oraz przez co najmniej trzy miesiące: 2011/2012, 2012/2013 oraz 2016/2017. Ich charakterystykę przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 2. Zależność formy kryształów względem: a) gęstości, b) twardości danej warstwy; objaśnienia w tabeli 1; dla przejrzystości wykresu pominięto następujące formy kryształów: 5 (szron wgłębny) – brak przypadków, 7 (lód) – nie określa się pozostałych parametrów, 8 (szron powierzchniowy) – brak przypadków; dla wykresów przyjęto następujące oznaczenia: wąsy – maksimum i minimum (największa i najmniejsza wartość mieszcząca się w obrębie półtorę odchylenia ćwiartkowego danej klasy), granice „pudełka” – pierwszy i trzeci kwartył, linia w środku „pudełka” – mediana, kropki – wartości odstające, tj. takie, które odstają o wartość większą niż 1,5 odchylenia ćwiartkowego; liczba po prawej stronie pudełka oznacza liczebność danej klasy

Fig. 2. Relation between a form of snow grains and: a) density, b) hardness of a layer; explanations in table 2; to keep chart legible, following forms of snow grains have been omitted: 5 (depth hoar) – no events, 7 (ice) – other parameters are not defined, 8 (surface hoar) – no events; following symbols have been used: whiskers – maximum and minimum (the highest and the lowest value within 1.5 of quartile deviation of a dataset), box borders – the first and the third quartile, a line inside a box – a median, dots – outliers; a value was considered an outlier if it lies further than 1.5 of quartile deviation of a dataset; a number on the right of a box denotes class cardinality

Tabela 2. Średnia i maksymalna grubość pokrywy śnieżnej dla wybranych sezonów oraz dla dziesięciolecia 2007/2008 – 2016/2017; za sezon przyjęto okres od 1 listopada danego roku do 31 maja roku następnego

Table 2. Mean and maximum snow depth for selected seasons as well as for a decade 2007/2008 – 2016/2017; a season was assumed to be a period between 1 November of a year and 31 May of a following year

Sezon	Grubość pokrywy śnieżnej	
	średnia	maksymalna
2011/2012	89	155
2012/2013	62	140
2016/2017	53	116
2007/2008 – 2016/2017 (średnia)	53	123

Na podstawie wykresu dla sezonu 2011/2012 (rys. 3a) można stwierdzić, że przebieg rozstępu gęstości bardzo dobrze odzwierciedla przebieg stopnia zagrożenia lawinowego. Najwyższe jego wartości występują po znacznych opadach śniegu – świeży śnieg cechuje się niską gęstością, zatem jego akumulacja na już istniejącej pokrywie śnieżnej przyczynia się do wzrostu jej rozstępu. Spadek rozstępu gęstości jest efektem metamorfozy ziaren śniegu w procesie osiadania lub topnienia pokrywy śnieżnej. Jedynym okresem, w którym rozstęp gęstości nie stanowił dobrej estymacji zagrożenia lawinowego jest początek sezonu. Szczegółowe badania pokrywy śnieżnej rozpoczęto 21 grudnia 2011 roku. Obowiązywał już wówczas drugi stopień zagrożenia lawinowego. Pokrywa śnieżna na Hali Gąsienicowej cechowała się niewielką grubością (27 cm na poletku) oraz cienkimi warstwami, co uniemożliwiło wykonanie pomiaru gęstości. Pomocną informację w takich okolicznościach niesie ze sobą wówczas rozstęp twardości. Na podstawie jego wartości możemy wywnioskować, że świeży opad spadł na już zalegającą pokrywę śnieżną. Jest to tzw. drugi opad, w literaturze przedmiotu jeden z wzorców zagrożenia lawinowego (Kurzeder, Feist 2013). I choć na wysokości Hali Gąsienicowej warstwa z pierwszego opadu niemal zanikła (9 cm odnotowane 16.12.2011 r.), to w wyższych partiach gór z pewnością miała większą miąższość – stąd wzrost zagrożenia lawinowego.

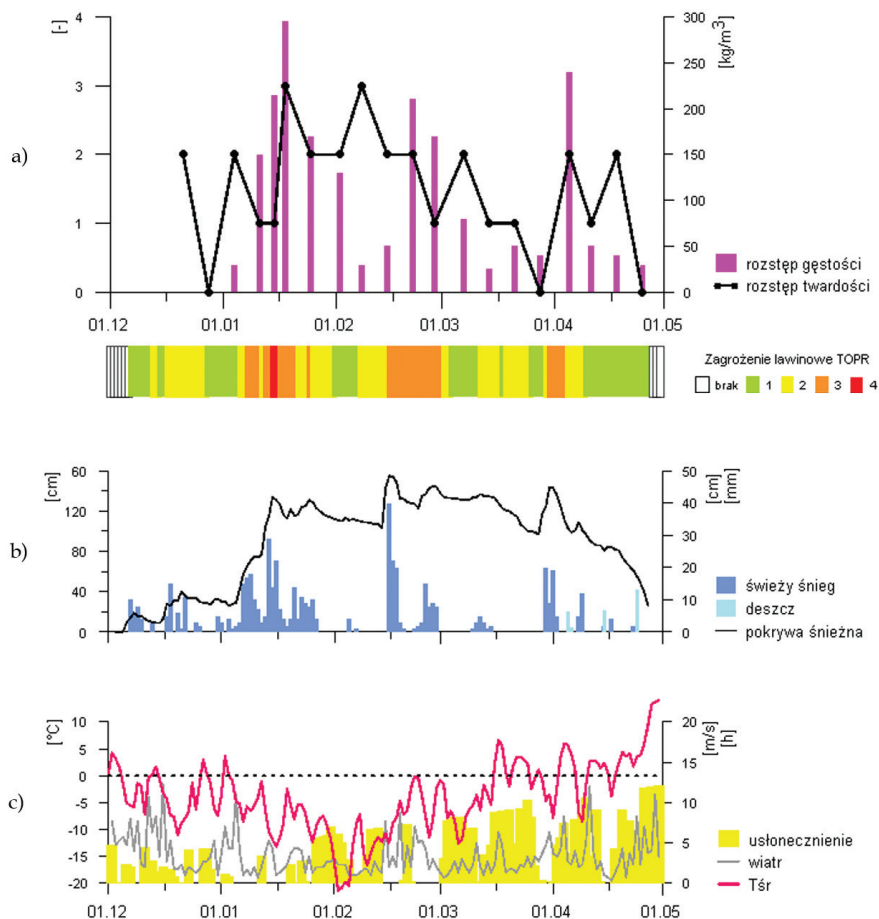
W przebiegu całego sezonu rozstęp twardości w mniejszym stopniu oddaje przebieg zagrożenia lawinowego, choć tendencje jego zmian są w większości analogiczne względem tendencji stopnia zagrożenia. Przyczyną tego jest głównie specyfika parametru twardości – może być on liczbą naturalną z przedziału 1-5 (Karzyński, Kotlarczyk 2005). W konsekwencji charakteryzuje się znacznie mniejszą zmiennością niż rozstęp gęstości. Największa niezgodność przebiegu obydwu parametrów pojawiła się 8 lutego. Przyczyną był niewielki opad śniegu (5 cm w ciągu trzech dni), który utworzył czterocentymetrową warstwę o twardości 1. Ze względu na miąższość, nie było możliwe zmierzenie jej gęstości. Niewielki opad w połączeniu z bardzo niskimi temperaturami przyczynił się do wzrostu zagrożenia lawinowego.

W sezonie 2012/2013 (rys. 4) akumulacja pokrywy śnieżnej na Hali Gąsienicowej rozpoczęła się w grudniu, jednak ocieplenie w okresie świąt Bożego Narodzenia sprawiło, że 2 stycznia 2013 r. jej grubość wynosiła tylko 4 cm. Wiek pokrywy śnieżnej zatem niemal „wyzerował się”, co wpłynęło na to, że styczniowe opady śniegu wywołały bardzo niewielki wzrost rozstępu gęstości (pomimo znacznego stopnia zagrożenia lawinowego). Podobnie jak to było w sezonie 2011/2012, w początkowym etapie tworzenia się pokrywy śnieżnej lepszym wskaźnikiem jest rozstępn twardości, którego podwyższone wartości pokrywają się z okresem obowiązywania podwyższonego zagrożenia lawinowego.

Ciekawy przypadek niezgodności pomiędzy przebiegiem rozstępu gęstości a stopniem zagrożenia lawinowego wystąpił 20 lutego 2013 roku. Tego dnia nastąpił znaczny wzrost rozstępu gęstości w wyniku dobowego opadu śniegu (16 cm). Choć TOPR utrzymał obowiązujący od kilku dni drugi stopień zagrożenia lawinowego, to z pewnością stabilność pokrywy śnieżnej uległa zmniejszeniu. Warstwę świeżego śniegu o podobnej miąższości odnotowano także na poletku w Morskim Oku, co raczej wyklucza lokalny charakter opadu, a zatem także lokalność zagrożenia lawinowego.

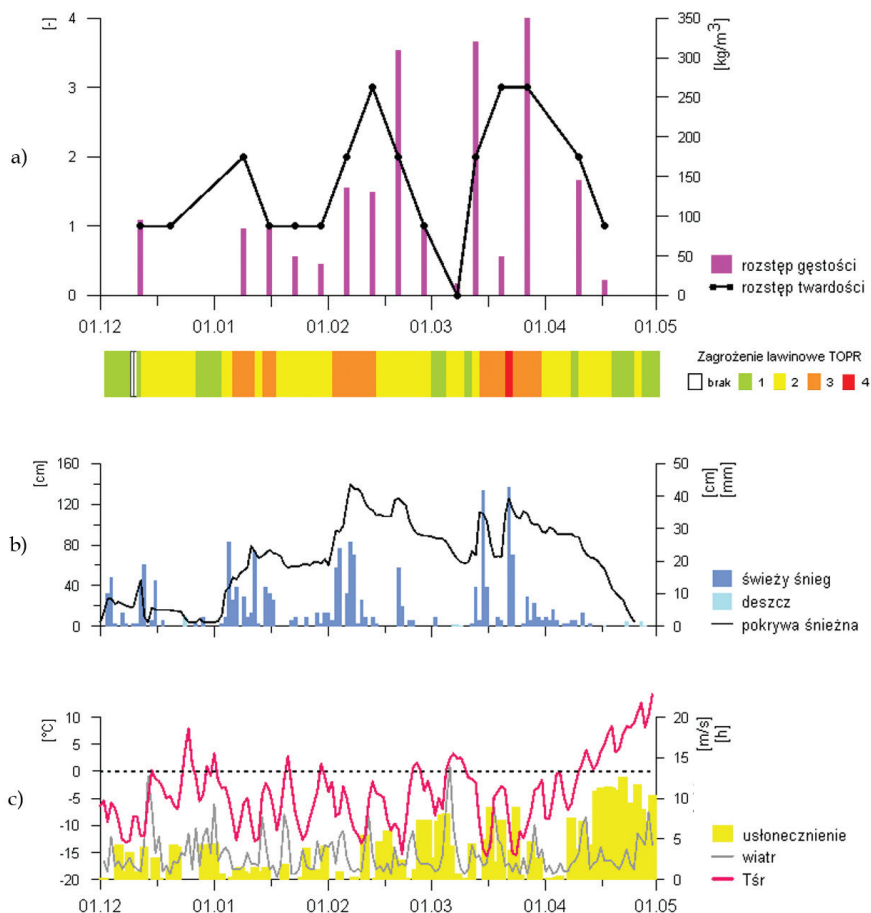
Niezgodność obydwu parametrów zaobserwować można również 20 marca 2013 roku. Rozstępn gęstości uległ znaczącemu zmniejszeniu pomimo tego, że jeszcze przed pięcioma dniami zanotowano dobowy opad śniegu w wysokości 42 cm. W następnym dniach jednak pokrywa śnieżna gwałtownie osiadała (rys. 4b). 18 marca, wskutek silnego wiatru o średniej dobowej prędkości 9 m/s, grubość pokrywy śnieżnej zmniejszyła się o 22 centymetry względem dnia poprzedniego. Należy zaznaczyć, że w tym dniu temperatura powietrza pozostawała ujemna przez całą dobę. W konsekwencji dwa dni później na poletku pomiarowym odnotowano na powierzchni jedynie sześciocentymetrową warstwę śniegu w początkowym stadium metamorfozy (gatunek 2), wskutek czego pomiar gęstości nie został dla niej wykonany. Gęstość niżej zalegających, starych warstw śniegu przekrystalizowanego (gatunek 6), była mało zróżnicowana – w konsekwencji wartość rozstępu gęstości była dla nich mała. Podobnie jak we wcześniej omawianych przypadkach, cenną informację o zróżnicowaniu właściwości pokrywy śnieżnej niesie wówczas rozstępn twardości.

W sezonie 2016/2017 (rys. 5) szczegółowe badania pokrywy śnieżnej rozpoczęto na początku grudnia, chociaż pokrywa śnieżna na Hali Gąsienicowej pojawiała się okresowo już w listopadzie. Można przypuszczać, że w wyższych partiach gór opady te ulegały już akumulacji, formując stałą pokrywę śnieżną, ponieważ TOPR rozpoczął ogłaszanie stopnia zagrożenia lawinowego już 4 listopada 2016 roku. Tak jak w poprzednich sezonach, początkowo gęstość pokrywy śnieżnej była mało zróżnicowana i dopiero pokrywa śnieżna o miąższości kilkudziesięciu centymetrów i kilku warstwach uwydatniła podobieństwo przebiegu rozstępu gęstości oraz twardości. W drugiej połowie stycznia rozstępn gęstości oraz twardości zgodnie malał, odzwierciedlając tempo stabilizacji pokrywy śnieżnej. Korelacja dla rozstępu twardości została zaburzona nieco w marcu – pomimo jego znaczącego wzrostu, stopień zagrożenia utrzymywany był na poziomie „dwójki”. Wzrost rozstępu był w tym wypadku spowodowany niewielką warstwą świeżego śniegu, która nie pogorszyła znacząco warunków lawinowych. W profilu wykonanym 8 marca 2017 r.



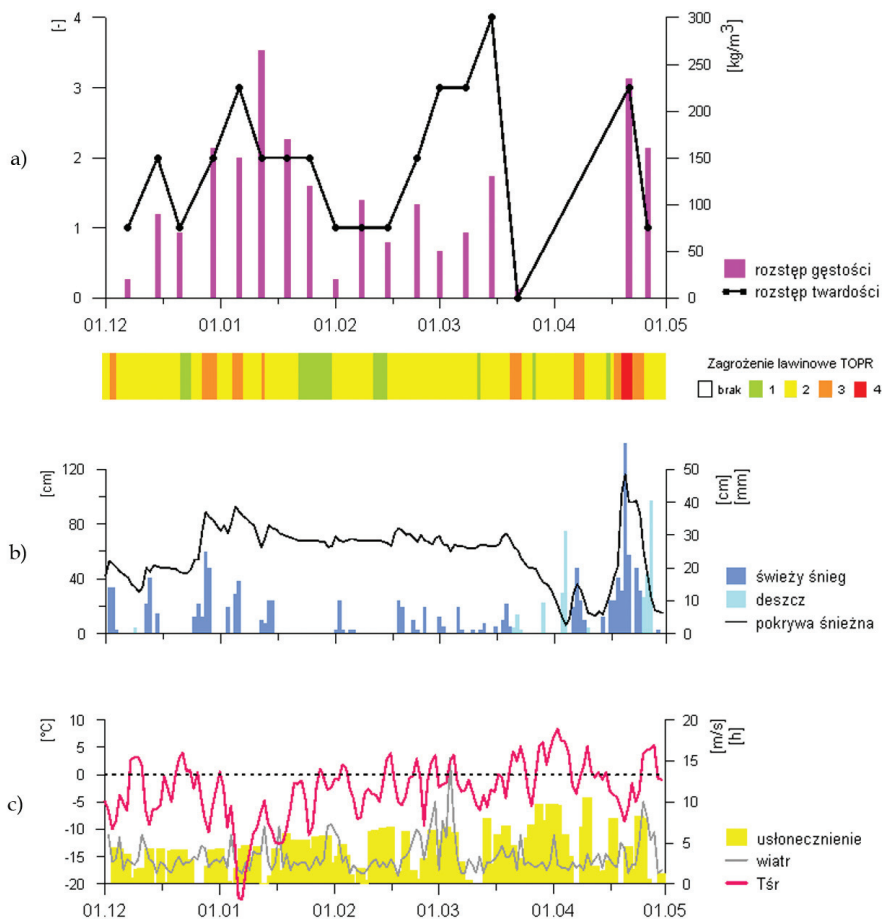
Rys. 3. Przebieg wybranych parametrów śniegowych oraz meteorologicznych w sezonie 2011/2012: a) rozstęp twardości, rozstęp gęstości oraz stopień zagrożenia lawinowego TOPR; b) grubość pokrywy śnieżnej (lewa oś), grubość śniegu świeżo spadłego oraz dobowa suma opadów deszczu (prawa oś); c) średnia temperatura dobowa (lewa oś), usłonecznienie oraz średnia dobowa prędkość wiatru (prawa oś)

Fig. 3. Variability of selected snow and meteorological parameters during 2011/2012 season: a) hardness range, density range and TOPR avalanche danger degree; b) snow depth (left axis), fresh snow depth and daily rain precipitation (right axis); c) mean daily air temperature (left axis), insolation and mean daily wind speed (right axis)



Rys. 4. Przebieg wybranych parametrów śniegowych oraz meteorologicznych w sezonie 2012/2013: a) rozstęp twardości, rozstęp gęstości oraz stopień zagrożenia lawinowego TOPR; b) grubość pokrywy śnieżnej (lewa oś), grubość śniegu świeżo spadłego oraz dobowa suma opadów deszczu (prawa oś); c) średnia temperatura dobowa (lewa oś), usłonecznienie oraz średnia dobowa prędkość wiatru (prawa oś)

Fig. 4. Variability of selected snow and meteorological parameters during 2012/2013 season: a) hardness range, density range and TOPR avalanche danger degree; b) snow depth (left axis), fresh snow depth and daily rain precipitation (right axis); c) mean daily air temperature (left axis), insolation and mean daily wind speed (right axis)



Rys. 5. Przebieg wybranych parametrów śniegowych oraz meteorologicznych w sezonie 2016/2017: a) rozstęp twardości, rozstęp gęstości oraz stopień zagrożenia lawinowego TOPR; b) grubość pokrywy śnieżnej (lewa oś), grubość śniegu świeżo spadłego oraz dobowa suma opadów deszczu (prawa oś); c) średnia temperatura dobowa (lewa oś), usłonecznienie oraz średnia dobowa prędkość wiatru (prawa oś)

Fig. 5. Variability of selected snow and meteorological parameters during 2016/2017 season: a) hardness range, density range and TOPR avalanche danger degree; b) snow depth (left axis), fresh snow depth and daily rain precipitation (right axis); c) mean daily air temperature (left axis), insolation and mean daily wind speed (right axis)

było to 1 cm śniegu świeżego oraz 4 cm śniegu w początkowym stadium metamorfozy (gatunek 2), zalegające na starszych warstwach. Nie był to wystarczający opad śniegu do podwyższenia stopnia zagrożenia lawinowego.

Ekstremalnie niskie wartości rozstępu obydwu parametrów 22 marca 2017 r. były skutkiem silnej odwilży – średnia temperatura dobowa przez kilka dni pozostawała dodatnia, pojawiły się także opady deszczu. Odwilż przyczynia się do zmniejszenia rozstępu gęstości oraz twardości. Cała pokrywa śnieżna staje się bardziej jednorodna i cechuje się większą gęstością oraz mniejszą twardością (Kłapowa 1980). Podwyższone zagrożenie lawinowe wynika wówczas z pojawienia się wody w stanie ciekłym, która obniża spójność całej pokrywy śnieżnej (Marasek 2003; Kurzeder, Feist 2013).

W okresie 22.03-21.04 2017 r. profile śnieżne nie były odsłaniane ze względu na zbyt małą ilość śniegu na Hali Gąsienicowej.

Z przeprowadzonej analizy przebiegu stopnia zagrożenia lawinowego oraz utworzonych przez autora parametrów wynika, że brak ich korelacji jest zazwyczaj konsekwencją zbyt niskiej częstotliwości wykonywania profili bądź też niedostatecznej grubości pokrywy śnieżnej na poletku. Częstotliwość wykonywania profili śniegowych określona jest w instrukcji IMGW-PIB jako raz w tygodniu (lecz zawsze w ten sam dzień tygodnia) a w razie potrzeby częściej (Karzyński, Kotlarczyk 2005). W praktyce częstsze odsłanianie profilu ma miejsce w przypadku znacznego opadu śniegu i pogorszenia warunków lawinowych. TOPR nie wykonuje profili śnieżnych – okazjonalnie wykonywane są testy kompresyjne lub testy poślizgu, a zagrożenie lawinowe oceniane jest zasadniczo na podstawie danych meteorologicznych (inf. ustna). W literaturze częstotliwość pomiarów także nie jest jednoznacznie określona. SLF w swojej instrukcji zaleca interwał dwutygodniowy (Schweizer, Wiesinger 2001). Amerykański Związek Lawinowy (ang. *American Avalanche Association*, AAA) nie podaje z kolei konkretnej liczby, twierdząc, że częstotliwość takich badań jest zależna od klimatu, ukształtowania terenu, pogody panującej w ostatnim czasie, aktualnej stabilności pokrywy śnieżnej oraz dominującego typu lawin (AAA 2016). W kontekście klimatu przejściowego, panującego na obszarze Tatr, najistotniejszym czynnikiem warunkującym zmianę stabilności pokrywy śnieżnej wydaje się być zmienność napływających mas powietrza i co za tym idzie typów pogody. To właśnie dynamika zmian warunków pogodowych bezpośrednio determinuje częstość wykonywania badań śniegowych. Istotne jest to zwłaszcza w początkowym okresie akumulacji pokrywy śnieżnej, gdy reakcja pokrywy śnieżnej na zmianę warunków meteorologicznych dokonuje się szybciej niż w przypadku jej znacznej miąższości (Kłapowa 1980).

Ponadto na początku sezonu zimowego dodatkowym ograniczeniem jest często niedostateczna grubość pokrywy śnieżnej, utrudniająca ocenę zagrożenia lawinowego w terenie wyżej położonym. Zagadnienie to sprowadza się do problemu reprezentatywności tego typu badań. Schweizer i Wiesinger (2001) podkreślają, że odsłonięty profil śnieżny jest reprezentatywny tylko dla ograniczonego obszaru o podobnej charakterystyce (np. stok o podobnym nachyleniu i ekspozycji, dno doliny). Z kolei Landry i in. (2002) przeprowadzili badania w górskim obszarze stanu Montana, z których wynika, że jedynie 50% profili odsłoniętych na stokach o stałym nachyleniu jest do siebie podobne

w sposób istotny statystycznie. Stąd coraz częściej do określania zagrożenia lawinowego na większym obszarze stosuje się dane satelitarne lub laserowe (Deems i in. 2016; Eckersdorfer i in. 2017).

Wnioski

Gęstość i twardość warstwy śniegu są parametrami, które w odmienny sposób zmieniają się wraz z przebiegiem metamorfozy pokrywy śnieżnej. Zmiany gęstości cechują się stałym trendem wzrostowym, zaś różnice między poszczególnymi klasami są na tyle wyraźne, że zasadniczo pozwalają na wydzielenie przedziałów gęstości właściwych każdemu z gatunków śniegu. Zaproponowana przez Kłapową (1980) granica metamorfozy topniejącej o wartości 400 kg/m^3 przypada na pierwszy kwartył zbioru gęstości dla topniejącego śniegu (gat. 6), co potwierdza prawidłowość jej określenia. W przypadku zależności twardości od formy kryształów możemy mówić o trendzie wzrostowym rozrzutu twardości. Świeżo spadły śnieg cechuje się najczęściej wyłącznie najmniejszą twardością. Z kolei warstwy w końcowych fazach metamorfozy (formy 4 i 6) cechują się rozrzutem pełnej skali twardości. Wówczas decydującym o twardości czynnikiem jest wilgotność.

Rozważając porównanie przebiegu rozstępu gęstości i twardości do przebiegu stopnia zagrożenia lawinowego, należy przyznać, że mimo znacznej różnicy rozdzielczości danych, a także nieuwzględnienia tak istotnego czynnika lawinotwórczego, jakim jest wpływ wiatru, oba parametry dość dobrze odzwierciedlają zmienność zagrożenia lawinowego. Ze względu na specyfikę parametru twardości, większe zróżnicowanie wykazuje rozstęg gęstości i to ten parametr dokładniej oddaje zmiany stabilności pokrywy śnieżnej. Niemniej jednak, w sytuacji małej ilości pokrywy śnieżnej oraz w początkowej fazie akumulacji pokrywy śnieżnej jego stosowalność jest bardzo ograniczona. Wówczas informację o stanie pokrywy śnieżnej niesie ze sobą rozstęg twardości, który uwzględnia także cienie warstwy pokrywy śnieżnej. Rozstęg twardości może być zatem traktowany jako wielkość pomocnicza i uzupełniająca.

Biorąc pod uwagę okresy, w których pomimo obowiązującego zagrożenia lawinowego pokrywa śnieżna na Hali Gąsienicowej była zbyt mała by odsonić profil, należy wysnuć wniosek, iż szczegółowe badania pokrywy śnieżnej powinny być wykonywane także w miejscu o większej wysokości nad poziomem morza. Takim punktem był w przeszłości stok Beskidu nieopodal Kasprowego Wierchu (1946 m n.p.m.), jednak w 2014 r. badania zostały tam zaniechane (Fiema i in. 2007). W opinii autora wykonywanie pomiarów w wyżej położonym miejscu byłoby bardziej praktyczne i przyniosłoby większą korzyść niż zwiększenie częstości obserwacji na Stacji Badań Niwalnych.

Tendencje zmian rozstępu gęstości dobrze oddają nie tylko wzrost zagrożenia lawinowego, ale także tempo osiadania pokrywy śnieżnej, czyli jej stabilizacji. Jest to cenna informacja, gdyż wzrost zagrożenia lawinowego w większości przypadków wiąże się z opadem śniegu, którego ilość łatwo zmierzyć bez konieczności odsłaniania profilu.

Osiadanie pokrywy śnieżnej i jej stabilizacja nie jest już jednak w tak bezpośredni sposób zależna od pojedynczego elementu meteorologicznego.

Przedstawione w artykule zależności wyznaczone dla Hali Gąsienicowej mogą być pomocne przy lokalnej ocenie stabilności pokrywy śnieżnej w terenie lawinowym na obszarze całych Tatr oraz w wyższych partiach Karpat.

L i t e r a t u r a

- AAA, 2016, Snow, weather and avalanches: observation guidelines for Avalanche Programs in the United States, American Avalanche Association, dostępne online https://static1.square-space.com/static/59d2a0f0e9bfdf20d6d654b7/t/5a1af2a5652dea2e1a5ea055/1511715529879/AAA_SWAG_Web+2.pdf (29.01.2020)
- Armstrong R., Brun E. (red.), 2010, Snow and climate: physical processes, surface energy exchange and modeling, Cambridge University Press, Cambridge, 256 s.
- Balon J., Jodłowski M., Krąż P., 2015, Tatry – regionalizacja fizycznogeograficzna, [w:] Atlas Tatr. Przyroda nieożywiona, K. Dąbrowska, M. Guzik (red.), Tatrzański Park Narodowy, Zakopane
- Błażejczyk K., Baranowski J., Błażejczyk J., Szmyd J., 2013, Klimat i bioklimat Hali Gąsienicowej, [w:] Dolina Suchej Wody w Tatrach. Środowisko i jej współczesne przemiany, Z. Rączkowska, A. Kotarba (red.), Prace Geograficzne, 239, 67-96
- Chomicz K., 1962, Klasyfikacja śniegu i badań śniegowych w Polsce. Śnieg i lawiny w Tatrach w roku 1960, Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa, 38 s.
- Chrustek P., 2013, Wpływ warunków śniegowych i terenowych na wielkość obszarów zagrożenia lawinowego w wybranych masywach górskich Karpat i Sudetów. rozprawa doktorska, Zakład Klimatologii IGI GP UJ, Kraków
- Deems J.S., Evanczyk R., Vellone D., Greene E., Weldon T., Finnegan D., Gadowski P., LeWinter A., 2016, Supporting, evaluating and planning avalanche control efforts with LIDAR-derived snow depth maps, [w:] Proceedings of the International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, dostępne online https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/ISSW16_O9.02.pdf (29.01.2020)
- Eckerstorfer M., Malnes E., Müller K., 2017, A complete snow avalanche activity record from a Norwegian forecasting region using Sentinel-1 satellite-radar data, Cold Regions Science and Technology, 144, 39-51, DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.08.004
- Fiema A., Karzyński A., Kotlarczyk M., Nodzyński T., 2007, Warunki śniegowe w Tatrach Polskich 2004/2005. Podsumowanie sezonu, Materiały Badawcze IMGW, 38, 124 s.
- Fiema A., Nodzyński T., 2013, Lawiny w ujęciu statystycznym, dostępne online <http://lawinoweabc.pl/archiwum/5-lawiny-w-ujeciu-statystycznym.html> (29.01.2020)
- Fierz C., Armstrong R., Durand Y., Etchevers P., Greene E., McClung D., Nishimura K., Satyawali P. i Sokratov S., 2009, The international classification for seasonal snow on the ground, IHP-VII Technical Documents in Hydrology No. 83, IACS Contribution No. 1, UNESCO-IHP, Paryż, dostępne online <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000186462> (29.01.2020)

- Gądek B., Grabiec M., Maciata A., Rączkowska Z., 2016, Variability of the snow avalanche danger in the Tatra Mountains during the past nine decades, *Geographia Polonica*, 89 (1), 65-77
- Geldsetzer, T., Jamieson B., 2000, Estimating dry snow density from grain form and hand hardness, [w:] *Proceedings of the International Snow Science Workshop*, Big Sky, Montana, USA, dostępne online <https://arc.lib.montana.edu/snow-science/objects/issw-2000-121-127.pdf> (29.01.2020)
- Hess M., 1965, Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Geograficzne*, 11, 267 s.
- Kacperek M., 2005, Kochaj śnieg, unikaj lawin, Wydawnictwo FreeRajdy, Tatrzański Park Narodowy, Kraków, 132 s.
- Karzyński M., Kotlarczyk M., 2005, Instrukcja do wykonywania profilu stratygraficznego pokrywy śnieżnej, Dział Służby Pomiarowo-Obszerwacyjnej IMGW, Kraków
- Karzyński M., Nodzyński T., 2005, Śnieg i lawiny w Tatrach Polskich w erze informatyzacji, [w:] *Hydrologia, meteorologia, klimatologia – badania naukowe i prognozy w erze informatyzacji*, M. Ozga-Zielińska, D. Limanówka (red.), IMGW, PTGeof., Warszawa, 107-113
- Kłapowa M., 1980, Metamorfoza śniegu w zależności od warunków atmosferycznych i rzeźby terenu w Tatrach, IMGW, Warszawa, 89 s.
- Kondracki J., 2011, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 468 s.
- Kozłowska-Szczęsna T., 2013, Stacja badawcza Instytut Geografii i Zagospodarowania Przestrzennego PAN im. Marii i Mieczysława Kłapów na Hali Gąsienicowej w Tatrach, [w:] *Dolina Suchej Wody w Tatrach. Środowisko i jej współczesne przemiany*, Z. Rączkowska, A. Kotarba (red.), *Prace Geograficzne*, 239, 147-166
- Kurzeder T., Feist H., 2013, *Lawiny. Poradnik dla narciarzy i turystów*, Tatrzański Park Narodowy, Zakopane, 235 s.
- Landry C., Birkeland K., Hansen K., Borkowski J., Brown R., Aspinall R., 2002, Snow stability on uniform slopes: implications for avalanche forecasting, *Montana State University*
- Lehning M., Bartelt P., Brown B., Russi T., Stöckli U., Zimmerli M., 1999, SNOWPACK model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations, *Cold Regions Science and Technology*, 30 (1-3), 145-157, DOI: 10.1016/S0165-232X(99)00022-1
- Limanówka D. (red.), 2013, 100 lat pomiarów meteorologicznych na Hali Gąsienicowej, IMGW-PIB, Kraków, 103 s.
- Marasek A., 2003, Lawiny śnieżne – geneza i zagrożenie, *Geografia w Szkole*, 5, 260-268
- Meløysund V., Leira B., Høiseth K., Lisø R., 2007, Predicting snow density using meteorological data, *Meteorological Applications*, 14 (4), 413-423, DOI: 10.1002/met.40
- Mościcki J.W., Kędzia S., 2001, Investigation of mountains permafrost in the Kozia Dolinka valley, Tatra Mountains, Poland, *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 55 (4), 235-240, DOI: 10.1080/00291950152746586
- Paryski W.H., Radwańska-Paryska Z., 1995, *Wielka Encyklopedia Tatrzańska*, Wydawnictwo Górskie, Poronin.
- Pomeroy J.W., Brun E., 2004, Physical properties of snow, *University of Saskatchewan*, dostępne online https://www.usask.ca/hydrology/papers/Pomeroy_et_al_2001.pdf (29.01.2020)
- Schweizer J., Jamieson J.B., 2003, Snowpack properties for snow profile analysis, *Cold Regions Science and Technology*, 37 (3), 233-241, DOI: 10.1016/S0165-232X(03)00067-3

- Schweizer J., Jamieson J.B., Schneebeli M., 2003, Snow avalanche formation, *Review of Geophysics*, 41 (4), DOI: 10.1029/2002RG000123
- Schweizer J., Wiesinger T., 2001, Snow profile interpretation for stability evaluation, *Cold Regions Science and Technology*, 33 (2-3), 179-188, DOI: 10.1016/S0165-232X(01)00036-2
- Trepińska J., 2002, *Górskie klimaty*, Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków, 201 s.
- Ustrnul Z., Walawender E., Czekierda D., Šťastný P., Lapin M., Mikulová K., 2015, Opady atmosferyczne i pokrywa śnieżna, [w:] *Atlas Tatr. Przyroda nieożywiona*, K. Dąbrowska, M. Guzik (red.), Tatrzański Park Narodowy, Zakopane

S t r e s z c z e n i e

W artykule dokonano analizy zróżnicowania gęstości oraz twardości warstw pokrywy śnieżnej w profilu w zależności od przebiegu metamorfozy śniegu. Porównano także ich przebieg sezonowy względem ogłaszanego przez Tatrzańskie Ochotnicze Pogotowie Ratunkowe (TOPR) stopnia zagrożenia lawinowego. Celem analizy jest dokładniejsze poznanie oraz weryfikacja już znanych mechanizmów metamorfozy śniegu, w szczególności w odniesieniu do stabilności pokrywy śnieżnej. Gęstość i twardość są właściwościami fizycznymi pokrywy śnieżnej określanymi w ramach szczegółowych badań pokrywy śnieżnej. Badania te wykonywane są raz w tygodniu na Stacji Badań Niwalnych IMGW-PIB na Hali Gąsienicowej. Bazowy zbiór danych do przeprowadzenia analizy stanowiło 141 szczegółowych badań pokrywy śnieżnej wykonanych w latach 2007/2008 – 2016/2017 wraz z dobowymi danymi meteorologicznymi z tego okresu. Porównanie przebiegu sezonowego dokonano na przykładzie trzech sezonów: 2011/2012, 2012/2013 oraz 2016/2017.

Zaproponowana przez Kłapową (1980) granica metamorfozy topnieniowej o wartości 400 kg/m^3 przypada na pierwszy kwartył zbioru gęstości dla topniejącego śniegu (gat. 6), co potwierdza prawidłowość jej określenia. Rozstęp gęstości oraz rozstęp twardości dobrze odzwierciedlają zmienność zagrożenia lawinowego przez większą część sezonu. Ze względu na specyfikę parametru twardości, większe zróżnicowanie wykazuje rozstęp gęstości i to ten parametr w sposób bardziej dokładny potrafi oddać zmiany stabilności pokrywy śnieżnej. Niemniej jednak, w sytuacji małej grubości pokrywy śnieżnej oraz w początkowej fazie akumulacji pokrywy śnieżnej jego stosowność jest bardzo ograniczona - wówczas pomocną informację o stanie pokrywy śnieżnej niesie ze sobą rozstęp twardości, który uwzględni także cienkie warstwy pokrywy śnieżnej. Rozstęp twardości może być zatem traktowany jako wielkość uzupełniająca dla rozstępu gęstości.

Przedstawione w artykule zależności wyznaczone dla Hali Gąsienicowej mogą być pomocne do lokalnej oceny stabilności pokrywy śnieżnej w terenie lawinowym na obszarze całych Tatr oraz w wyższych partiach Karpat.

Słowa kluczowe: pokrywa śnieżna, lawiny, Hala Gąsienicowa, Tatry.

S u m m a r y

In this paper the variability of density and hardness of a snow layer has been analysed in relation to metamorphism stage. Furthermore, a comparison between their variability and the level of avalanche danger announced by Tatra Volunteer Rescue Service has been made. The purpose of the analysis is to get to know better about the rules of snow metamorphosis as well as to verify the already known ones, particularly regarding the stability of a snowpack.

Snow density and hardness are physical properties of snow layer specified during detailed snowpack investigations. The investigations are conducted weekly at the Nival Research Station of Institute of Meteorology and Water Management at Hala Gąsienicowa (Tatra Mts). The original data base comprises 141 detailed snowpack investigations conducted in winter seasons 2007/2008 - 2016/2017 as well as meteorological data from that time. The comparison of a seasonal variability was exemplified by presenting three seasons - 2011/2012, 2012/2013 and 2016/2017.

A limit of wet snow metamorphism assumed by Klapowa (1980) to be 400 kg/m^3 falls close to the first quartile of density dataset for melting snow (form 6) what in fact confirms her assumption. Density and hardness range reflect well the variability of avalanche danger during most of a season. Due to a specific nature of hardness parameter, it is density range that shows bigger variability and therefore is able to reflect changes in a snowpack stability more accurately. Nevertheless, in case of poor snow depth as well as at the beginning of snow accumulation its application is limited. In such cases hardness range carries a helpful piece of information about the state of a snow cover as it takes into account also thin layers in a snowpack. Hardness range could be therefore considered a complementary parameter to density range.

The relations presented in an article, which has been observed for Hala Gąsienicowa, could be useful for a local evaluation of snowpack stability in an avalanche area in Tatra Mts as well as in higher parts of Carpathian Mts.

Key words: snow cover, avalanches, Hala Gąsienicowa, Tatra Mountains.