

## Uwarunkowania przymrozków na przykładzie epizodu z lipca 1996 roku na Hali Izerskiej w Górach Izerskich w kontekście gospodarki leśnej

The effects of frost conditions on forest management  
based on the example of the July 1996 period at Hala Izerska in the Izera Mountains

**Grzegorz Urban**

Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział we Wrocławiu,  
ul. Parkowa 30, 51–616 Wrocław

Tel. +48 71 32 00 161; e-mail: grzegorz.urban@imgw.pl, urbag@poczta.onet.pl

**Abstract.** This paper presents the characteristics of a frost period that occurred on July 20–23, 1996, in the center of the Izera Mountains in the context of forest management. The source data consisted of air temperature measurements from the author's own work as well as data obtained from archival databases of the Institute of Meteorology and Water Management, Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection, the University of Wrocław and the Bureau of Forest Management and Geodesy in Brzeg. Due to the unusual time of frost and its intensity, the impact of this particular period was extreme. For the center of the mountain dale Hala Izerska, the estimated probability of frost temperatures of  $-5.5^{\circ}\text{C}$  two meters above ground level is 2.4% for the month of July. Therefore, in this area such a sharp decline of  $T_{\text{min}}$  in the middle of the growing season is predicted to occur only once every 40–50 years. In the Izera Mountains, strong nocturnal decreases of  $T_{\text{min}}$  below  $0^{\circ}\text{C}$  during the growing season occur almost every year causing significant damage to silviculture. Represented here by the mountain dale Hala Izerska, the central Izera Mountains are one of the coldest or even the coldest site in Poland in terms of absolute minimums of air temperature during the growing season.

Knowledge on the impact of climate, such as thermal factors, on tree stands enables silvicultural work in mountain areas to be optimized, ultimately allowing funding to be rationalized. The distinct climatic conditions of mountain basins and valleys as well as slopes and plateaus of similar altitudes need to be taken into consideration.

**Key words:** frost, growing season, damage to forests, the Izera Mountains

### 1. Wstęp

Warunki klimatyczne wywierają wielostronny wpływ na stan ekosystemów leśnych. Do głównych czynników meteorologicznych powodujących szkody abiotyczne w lasach zalicza się: silny wiatr, intensywne opady śniegu, suszę, głębokie spadki temperatury powietrza, oblodzenie czy obciążenie szadzią.

Problematykę szkód w lasach od czynników atmosferycznych przedstawiono w wielu pracach (Zajączkowski 1984, 1991; Mikułowski 1998, 2002; Urban

2002; Urban et al. 2000, 2005, 2011; Zachara 2006; Gil i Zachara 2006; Zachara et al. 2007). W lasach, oprócz najczęstszych i najbardziej spektakularnych szkód od wiatru i śniegu, zdarzają się istotne szkody ekonomiczne powodowane także przez inne czynniki, np. spadek temperatury powietrza poniżej  $0,0^{\circ}\text{C}$  w okresie wegetacyjnym.

Temperatury ekstremalne są ważnym czynnikiem wpływającym na warunki ekologiczne w ekosystemach górskich, szczególnie temperatury najniższe występujące w różnych porach roku. Uszkodzenia roślin, w tym

stosunkowo odpornych drzew świerkowych, spowodowane niską temperaturą powietrza, mogą powstawać w krótkim czasie – kilku godzin. Powstają one w układach wysokiego ciśnienia, podczas pogody warunkującej radiacyjne wychłodzenie podłoża i dolnych warstw atmosfery. Takie warunki pogodowe związane są z określonymi sytuacjami synoptycznymi i specyficzną morfologią terenu. Zostaną one opisane w dalszej części pracy.

W czasie prowadzenia pomiarów meteorologicznych, od 1995 r., w Górach Izerskich w okresie wegetacyjnym wystąpiły liczne epizody ze spadkiem temperatury powietrza poniżej 0°C na wysokości 2 m nad gruntem.

Jednym z najistotniejszych, ze względu na szkody powstałe w odnowieniach lasu w Górach Izerskich, letnich epizodów przymrozkowych, była sytuacja w dniach 20–23 lipca 1996 roku. Z uwagi na wyjątkowość (ekstremalność) pod względem głębokości spadku temperatury powietrza i czasu wystąpienia (środek sezonu wegetacyjnego) tego przymrozku konieczne wydaje się pełniejsze jego udokumentowanie i odniesienie do obszaru wykraczającego poza Góry Izerskie.

## 2. Obszar badań

Góry Izerskie stanowią skrajnie zachodnią część Sudetów Zachodnich i cechują się wyjątkowo dużym zasięgiem partii wierzchowinowych, wzniesionych ponad 800 m n.p.m. W przeciwieństwie do innych maszywów sudeckich wierzchowina Gór Izerskich nie jest rozcięta dolinami rzecznyymi, które są tu szerokie i płytkie i w wielu miejscach mają charakter rozległych, wysoko położonych, kotlin śródgórskich, czego przykładem jest rozległa Hala Izerska. Zajmuje ona powierzchnię ok. 400 ha i rozciąga się w strefie wysokościowej 820–880 m n.p.m. Charakter morfologii terenu, wraz z punktem pomiarowym Jagnięcy Potok na Hali Izerskiej, zobrazowano na fotografii 1.

Specyficzne cechy rzeźby Gór Izerskich (szerszy opis w dalszej części pracy) sprzyjają wyjątkowo silnym i częstym inwersjom termicznym, z którymi związane są intensywne przymrozki, szczególnie niebezpieczne dla drzewostanów w okresie wegetacyjnym.

Po przymrozkach z lipca 1996 r. w obrębach leśnych Świeradów i Szklarska Poręba powstały uszkodzenia upraw świerkowych obejmujące ponad 50% ich powierzchni, a w skrajnych przypadkach – w dnach kotlin śródgórskich – nawet do 90% (BULiGL 1998, 1999; fot. 2 i 3). Warstwa inwersyjna z bardzo niską temperaturą minimalną ( $T_{min}$ ) powietrza była na tyle głęboka, że uszkodzenia pędu wierzchołkowego świerków wystąpiły nawet na wysokości 2 m n.p.g. Uszkodzenia objęły pędy w zewnętrznej części koron dorosłych (kil-



**Fot. 1. Mgły radiacyjne na Hali Izerskiej, widoczne stanowisko pomiarowe Jagnięcy Potok (825 m n.p.m.), widok w kierunku NNW (fot. G. Urban; 4.VI.1999 r.)**

Photograph 1. Radiation fog at the dale Hala Izerska, the Jagnięcy Potok measurement station (825 m), view towards NNW (photograph by G. Urban; June 4, 1999).



**Fot. 2 i 3. Uszkodzenia świerka po epizodzie przymrozkowym w dniach 20–23.VII.1996 r., Hala Izerska w Górach Izerskich, okolice ujścia Jagnięcego Potoku (fot. M. Sobik, 01.08.1996 r.)**

Photographs 2 and 3. Damage of spruce after the frost episode of July 20–23, 1996 at Hala Izerska in the Izera Mountains, near the estuary of stream Jagnięcy Potok (photograph by M. Sobik, August 1, 1996).

kudziesięcioletnich) świerków, które wskutek niemal corocznych uszkodzeń przymrozkowych przyjęły formę skarłowaciałą (krzacza).

Głębokie spadki temperatury minimalnej powietrza poniżej 0°C w środku lata są czynnikiem zakłócającym w sposób drastyczny funkcje życiowe ekosystemów leśnych. Uszkodzone i osłabione drzewostany stają się bardziej podatne na działanie czynników biotycznych, co w konsekwencji może doprowadzić do ich zupełnego zamarcia.

## 3. Dane źródłowe i metoda

Podstawę analizy stanowiły wyniki pomiarów temperatury powietrza zebrane przez autora w Górach Izerskich w ramach badań prowadzonych przez ówczesny Zakład Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego (ZMiK UW. 1995–2000). Dodatkowo wykorzystano dane meteorologiczne z lipca 1996 r. ze

stacji meteorologicznych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) oraz z Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska (WIOŚ) w Jeleniej Górze zlokalizowanych w Górach Izerskich i ich sąsiedztwie. Dane z tych stacji stanowiły tło sytuacyjne oraz stwarzały możliwość weryfikacji i uzupełnienia własnych pomiarów. Rozmieszczenie przestrzenne stacji pomiarowych wykorzystanych w niniejszej pracy i ich charakterystykę obrazują tabela 1 i rycina 1.

Analiza sytuacji barycznej i warunków pogodowych nad Europą i Polską, ze szczególnym uwzględnieniem rejonu Gór Izerskich, została przeprowadzona na podstawie: map synoptycznych za okres 19–22.07.1996 r., codziennych biuletynów meteorologicznych IMGW za okres 19–23.07.1996 r., biuletynu Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW z lipca 1996 r., diagramów i danych z sondażu aerologicznego dla Wrocławia i Pragi oraz informacji z serwisów inter-

netowych: www.knmi.nl, www.imgw.pl, www.chmi.cz, www.weather.uwoyo.edu.

Niezbędne dane na temat rozmiarów szkód w drzewostanach uzyskano z Biura Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej w Brzegu (BULiGL 1998 i 1999).

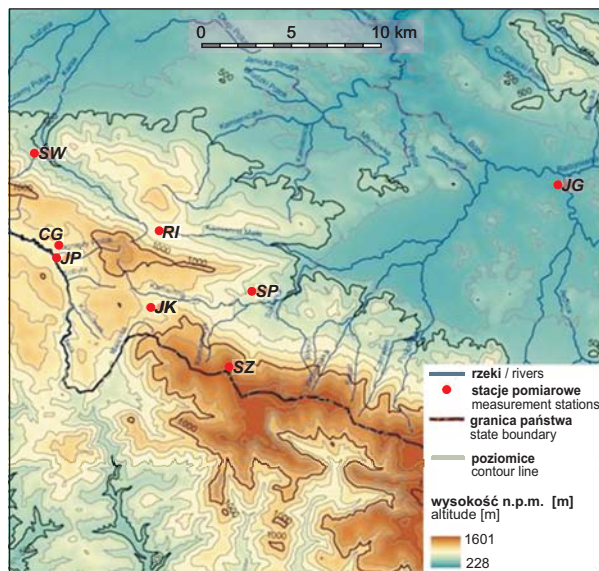
W pracy określono prawdopodobieństwo wystąpienia w lipcu na Hali Izerskiej  $T_{min}$  dobowej równej  $-5,5^{\circ}\text{C}$ , a więc najniższej zarejestrowanej podczas omawianego epizodu przymrozkowego. Prawdopodobieństwo obliczono na podstawie dostępnych danych  $T_{min}$  dobowych z lipca dla czterech lat: 1998, 1999, 2004 i 2006. Stwierdzono, że wielkość  $T_{min}$  podlega rozkładowi normalnemu z parametrami: średnią równą  $6,68^{\circ}\text{C}$  oraz odchyleniem standardowym równym  $3,842^{\circ}\text{C}$ . Fakt ten ustalono za pomocą testu zgodności Chi-kwadrat. Obliczone prawdopodobieństwo wyniosło  $2,4\%$ , co oznacza powtarzalność zjawiska co 40–50 lat.

**Tabela 1. Stacje pomiarowe w Górach Izerskich i okolicy**

Table 1. Measurement stations in the Izera Mountains and surrounding area

Stanowisko pomiarowe Measurement station	Skrót Abbreviation	Wysokość [m n.p.m.] Altitude [m a.s.l.]	Przyjna leżność* Operator*	Forma terenu Type of terrain
Jelenia Góra	JG	341	IMGW	<b>wklęsła, dno Kotliny Jeleniogórskiej</b> concave landform, Jelenia Góra Basin floor
Świeradów Zdrój	ŚW	543	IMGW	<b>wypukła, stok o ekspozycji NE, ok. 80 m nad dnem doliny Kwisy</b> convex landform, hilltop with a NE exposure, about 80 m above the Kwisa river valley floor
Szklarska Poręba	SP	650	IMGW	<b>wklęsła, dolna część N stoku Szrenicy, prawa strona doliny Kamieńczyka ok. 20 m ponad korytem Kamieńczyka</b> concave landform, lower N portion of Szrenica slope, right side of the Kamieńczyk river valley, about 20 m above the Kamieńczyk stream bed
Rozdroże Izerskie	RI	770	WIOŚ	<b>wypukła, stok tuż nad szeroką otwartą przełęczą łączącą Wysoki Grzbiet z Grzbietem Kamienickim</b> convex landform, slope just above a broad open mountain pass connecting Wysoki Grzbiet and Kamienicki Grzbiet
Jagnięcy Potok	JP	825	ZMiK UW r	<b>wklęsła, terasa zalewowa na Hali Izerskiej, lewy brzeg Izery i lewy brzeg Jagnięcego Potoku w odległości ok. 100 m od tych cieków; ok. 3–4 m nad lustrem wody w Izerze, teren otwarty trawiasty</b> concave landform, flood plain at mountain dale Hala Izerska, left bank of the Izera and left bank of the Jagnięcy Potok, about 100 m from these watercourses, about 3–4 m above the water level of the Izera river, open, grassy area
Chatka Górzystów na Hali Izerskiej	CG	840	ZMiK UW r	<b>wklęsła, dolna część zboczy doliny Izery, teren otwarty trawiasty</b> / concave landform, lower part of the slope of the Izera river valley, open and grassy
Jakuszyce	JK	860	IMGW	<b>obniżenie w obrębie rozległej przełęczy, prawy brzeg Kamiennej, terasa nadzalewowa</b> concave landform, in the vicinity of a broad mountain pass, right bank of the Kamienna river, flood plain
Szrenica	SZ	1332	ZMiK UW r	<b>wypukła, górna część stoku WSW</b> convex landform, upper part of the slope WSW

\* IMGW – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, WIOŚ – Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska, ZMiK UW r – Zakład Meteorologii i Klimatologii Uniwersytetu Wrocławskiego



Rycina 1. Rozmieszczenie stacji pomiarowych na tle rzeźby terenu. Objasnienia skrótów w tabeli 1  
Figure 1. Location of measurement stations. Key to abbreviations is presented in Table 1

## 4. Wyniki i dyskusja

### 4.1. Meteorologiczno-morfologiczne uwarunkowania epizodu pogodowego w dniach 20–23.07.1996 r.

W dniach 20–23.07.1996 r. Polska znajdowała się pod wpływem wału wysokiego ciśnienia o osi NE-SW. Związana z tym układem barycznym (o bardzo słabym poziomym gradiencie ciśnienia atmosferycznego) masa powietrza arktycznego starego (PAs), cechująca się małą wilgotnością względną i dużą przezroczystością, sprzyjała intensywnemu wypromieniowaniu ciepła z gruntu, a w konsekwencji powstaniu bardzo głębokiego przymrozku radiacyjnego.

Charakter masy powietrza dobrze oddają dane z sondażu atmosfery wykonanego w dniu 21 lipca 1996 r. nad Wrocławiem (tab. 2). Z materiałów tych wynika, że dla ciśnienia 925 hPa na poziomie 875 m n.p.m., a więc na wysokości odpowiadającej Hali Izerskiej, masa powietrza była stosunkowo sucha (wilgotność względna 57%, wyznaczony z tablic psychrometrycznych niedosyt wilgotności wynosił 5,03 hPa), prędkość wiatru z kierunku N wynosiła ok. 4 m/s (tab. 2).

Wykonano również pionowy sondaż atmosfery nad Pragą (położoną na wysokości 305 m n.p.m. po drugiej stronie Gór Izerskich). Wskazał on, że parametry wilgotności masy powietrza przy ciśnieniu 925 hPa były

Tabela 2. Dane z sondażu aerologicznego nad Wrocławiem z dnia 21.VII.1996 r. z godz. 00 UTC [źródło: [www.weather.uwo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwo.edu/upperair/sounding.html)]  
Table 2. Data from a weather balloon above Wrocław on July 21, 1996 at the hour of 00:00 UTC [source: [www.weather.uwo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwo.edu/upperair/sounding.html)]

<i>P</i>	<i>H</i>	<i>T</i>	<i>Td</i>	<i>U</i>	<i>Mixr</i>	<i>V</i>	<i>L</i>
hPa	m	°C	°C	%	g/kg	m/s	0–360°
1012,0	119	12,2	6,2	67	5,91	0	0
1001,0	211	11,8	6,8	71	6,23	5	10
996,0	253	12,8	6,8	67	6,26	7	15
991,0	296	13,8	6,8	63	6,29	8	40
985,0	347	13,4	6,3	62	6,12	8	60
925,0	875	9,4	1,4	57	4,60	4	5
903,0	1073	7,7	0,7	61	4,48	3	40
850,0	1572	3,4	-1,0	73	4,20	5	355
811,0	1947	0,6	-2,8	78	3,85	5	25
792,0	2136	-0,8	-3,7	81	3,69	5	10
750,0	2570	-4,1	-5,8	88	3,32	6	40
723,0	2862	-6,3	-7,2	93	3,09	5,5	26
719,0	2960	-6,7	-11,6	68	2,20	5,5	24
707,0	3038	-4,5	-25,5	18	0,68	5	17
703,0	3082	-4,6	-25,6	18	0,68	5	15
700,0	3116	-4,7	-25,7	18	0,68	6	5

Objasnienia: *P* – ciśnienie atmosferyczne, *H* – wysokość bezwzględna, *T* – temperatura powietrza, *Td* – temperatura punktu rosy, *U* – wilgotność względna powietrza, *Mixr* – stosunek zmieszania pary wodnej, *V* – prędkość wiatru, *L* – kierunek wiatru  
Key: *P* – atmospheric pressure, *H* – altitude, *T* – air temperature, *Td* – dew point temperature, *U* – humidity, *Mixr* – the mixing ratio of water vapor, *V* – wind velocity, *L* – wind direction

podobne jak nad Wrocławiem (niedosyt wilgotności wyznaczony z tablic psychrometrycznych osiągnął 6,2 hPa). Masa była więc stosunkowo sucha, co sprzyjało wypromieniowaniu ciepła z gruntu.

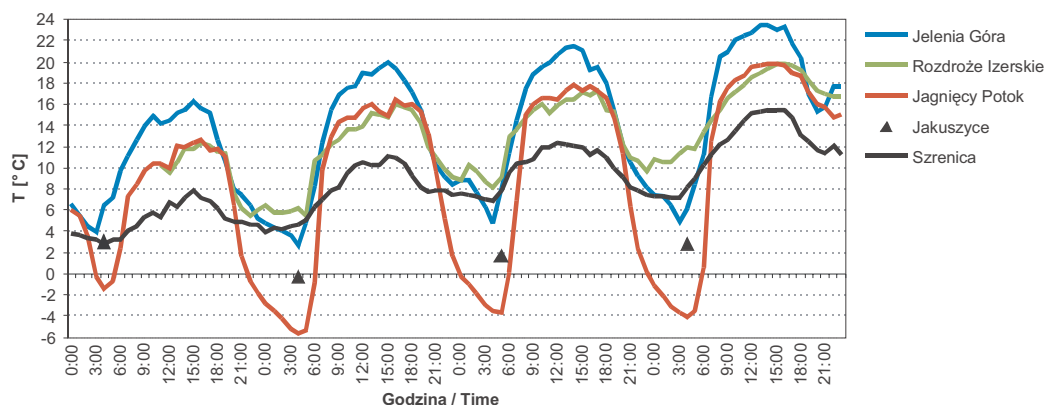
W dniu 21 lipca, a więc w środku sezonu wegetacyjnego, w punkcie pomiarowym Jagnięcy Potok (JP) na wysokości 2 m nad powierzchnią gruntu zanotowano temperaturę powietrza:  $-5,5^{\circ}\text{C}$ , a w kolejnych czterech dniach temperaturę poniżej  $0^{\circ}\text{C}$ . W tych samych dniach w stacjach, w których były warunki sprzyjające do powstawania mrozowisk, takich jak Jakuszyce (JK) czy Jelenia Góra (JG), temperatury minimalne były o kilka  $^{\circ}\text{C}$  wyższe. Przy czym tylko w Jakuszczykach  $T_{min}$  w dniu 21 lipca spadła poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  i wynosiła:  $-0,3^{\circ}\text{C}$  (ryc. 2).

Podczas trwania tego epizodu pogodowego zaszła się całonocna radiacyjna inwersja termiczna, wyraźnie widoczna w kolejnych czterech nocach, pomiędzy stacjami JP i SZ. Inwersja wystąpiła również pomiędzy stanowiskami JG i SZ, lecz zaznaczona nieco krócej i słabiej, gdyż trwała tylko przez kilka godzin podczas trzech ostatnich nocy – odpowiednio przez 5, 2 i 4 godziny. Inwersja termiczna zanikała w godzinach

przedpołudniowych, a spadek temperatury powietrza wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza był zbliżony do gradientu suchoadiabatycznego, tzn. ok.  $1,0^{\circ}\text{C}$  na  $100\text{ m}$  przyrostu wysokości (ryc. 2).

Na uwagę zasługuje fakt, że na Rozdrożu Izerskim (RI), położonym także we wnętrzu Gór Izerskich i zaledwie o ok.  $50\text{ m}$  niżej niż punkt Jagnięcy Potok (JP), temperatura minimalna ani razu nie spadła poniżej  $+5,0^{\circ}\text{C}$ . W dniu 21 lipca osiągnęła wartość  $+5,4^{\circ}\text{C}$ . Wyraźnie zaznaczył się tutaj wpływ formy terenu na rozkład minimalnej temperatury powietrza. W przypadku JP płaskodenna kotlina śródgórska sprzyjała tworzeniu się zastoisk zimnego powietrza, a w przypadku RI przełęcz dawała możliwość odpływu zimnego powietrza w dół doliny.

Na podstawie związku temperatury minimalnej powietrza na wysokości  $2\text{ m}$  i  $0,05\text{ m}$  n.p.g. przy antycyklo-nalnym typie cyrkulacji w punkcie CG na Hali Izerskiej stwierdzić można, że dnia 21 lipca 1996 r.  $T_{min}$  przy gruncie mogła osiągnąć lokalnie wielkość nawet  $-10,0^{\circ}\text{C}$  (Urban 2002). Wielkości temperatury minimalnej powietrza, zarejestrowane w dniach 20–23.07.1996 r. na innych stacjach pomiarowych IMGW w Polsce, nigdzie nie osiągnęły tak niskich wartości jak w centrum Hali Izerskiej na stanowisku Jagnięcy Potok (tab. 3). Nawet w dnie Kotliny Jeleniogórskiej, w stacji Jelenia Góra, gdzie w klatce meteorologicznej zmierzono absolutne minimum temperatury powietrza w Polsce po II wojnie światowej, wynoszące:  $-36,9^{\circ}\text{C}$  (Kuziemska 1983), tego dnia  $T_{min}$  wyniosła  $+3,0^{\circ}\text{C}$  (tab. 3).



Rycina 2. Przebieg dobowy temperatury powietrza w wybranych stanowiskach pomiarowych w dniach 20–23.07.1996 r. Objasnienia skrótów legendy w tabeli 1.

Figure 2. Diurnal course of air temperature at selected measurement stations for July 20–23, 1996. Key to abbreviations is presented in Table 1.

Tabela 3. Temperatura minimalna powietrza na wysokości  $2\text{ m}$  ( $T_{min}$ ) i  $0,05\text{ m}$  ( $T_{min+5}$ ) nad powierzchnią gruntu w wybranych stacjach synoptycznych IMGW w Polsce w dniach 20–23.07.1996 r. [ $^{\circ}\text{C}$ ] (Źródło: Codzienny Biuletyn Meteorologiczny IMGW)

Table 3. Minimal air temperature at a height of  $2\text{ m}$  ( $T_{min}$ ) and  $0.05\text{ m}$  ( $T_{min+5}$ ) above ground level at selected IMWM synoptic stations in Poland for July 20–23, 1996 [ $^{\circ}\text{C}$ ] (Source: Codzienny Biuletyn Meteorologiczny IMGW)

Stacja pomiarowa Synoptic station	20.07.1996	21.07.1996	22.07.1996	23.07.1996
	$T_{min} / T_{min+5}$	$T_{min} / T_{min+5}$	$T_{min} / T_{min+5}$	$T_{min} / T_{min+5}$
Białystok	10 / 9	7 / 6	8 / 6	8 / 3
Jelenia Góra	4 / 1	3 / 1	5 / 2	5 / 2
Kasprowy Wierch	0 / ×	-1 / ×	4 / ×	1 / ×
Kłodzko	6 / 3	4 / 2	6 / 4	6 / 3
Lębork	13 / 13	12 / 10	4 / 1	7 / 4
Przemyśl	10 / 9	9 / 8	8 / 7	9 / 7
Resko	5 / 1	6 / 3	6 / 3	8 / 6
Siedlce	10 / 10	6 / 5	6 / 4	5 / 3
Suwałki	10 / 9	6 / 4	7 / 5	8 / 2
Śnieżka	1 / ×	2 / ×	5 / ×	6 / ×
Wrocław	8 / 6	6 / 3	9 / 5	7 / 4
Zakopane	7 / 7	4 / 3	4 / 4	4 / 2

× – pomiaru nie dokonuje się / measurements not made

Główne cechy rzeźby Gór Izerskich, a więc progi orograficzne od zachodu i północy o dużych wysokościach względnych, a w obrębie centralnej części gór obecność rozległych płaskodennych obniżień terenowych, o małym spadku podłużnym, w wielu miejscach mających charakter rozległych kotlin śródgórskich, powodują powstanie warunków klimatycznych odmiennych niż w innych pasmach sudeckich. Zamknięte obniżenia terenu na wysokości ponad 750 m n.p.m. są unikatowym elementem rzeźby terenu w skali Sudetów (Migoń 1998).

Nieckowate zagłębienia w strefie wierzchowinowej gór stanowią miejsca, w których w warunkach antycyklonalnej pogody radiacyjnej gromadzi się zimne powietrze spływające z otaczających stoków, tworząc zastoiska chłodnego powietrza. Zastoiska (mrozowiska, zmrozowiska) te odgrywają istotną rolę w kształtowaniu się warunków egzystencji zbiorowisk roślinnych. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym tworzeniu się intensywnych inwersji radiacyjnych było silne wylesienie wierzchowin i stoków górskich, będące skutkiem klęski ekologicznej, co ułatwiało grawitacyjne spływanie zimnego powietrza w doliny. Zapewne istotny jest również brak we wnętrzu Gór Izerskich osadnictwa, które w innych obszarach – poprzez emisję z palenisk domowych – przyczynia się do zmniejszenia ucieczki ciepła drogą nocnego wypromieniowania w paśmie dalekiej podczerwieni (Sobik 1998).

Powyższe czynniki powodują częste i intensywne inwersje termiczne, które w ciepłej części roku ograniczają się do nocnej pory doby i dotyczą przede wszystkim temperatury minimalnej  $T_{min}$ . W chłodnej części roku inwersje temperatury powietrza są znacznie częstsze, silniejsze i trwające dłużej; obejmujące poza  $T_{min}$  także temperaturę średnią dobową  $T_s$ , a nawet średnią miesięczną minimalną temperaturę i średnią miesięczną, a sporadycznie również temperaturę maksymalną  $T_{max}$  (Sobik, Urban 2000; Urban 2002). Z uwagi na stosunkowo niewielkie rozmiary horyzontalne obniżień śródgórskich, do których zalicza się Hala Izerska, temperatura powietrza jest dodatkowo obniżona wskutek braku ocieplającego wpływu fenu, który ma istotne znaczenie w kształtowaniu się warunków termicznych na północnych stokach Karkonoszy i Gór Izerskich oraz w rozległej, sąsiedniej Kotlinie Jeleniogórskiej.

W celu sprawdzenia częstości i intensywności występowania spadków  $T_{min}$  powietrza poniżej  $0,0^{\circ}\text{C}$  w środku sezonu wegetacyjnego przeanalizowano dostępne dane pomiarowe dotyczące centrum Gór Izerskich (Deutsches Meteorologisches Jahrbuch 1934–1938; IMGW; UWr). Na tym obszarze spadki  $T_{min}$  poniżej  $0,0^{\circ}\text{C}$  na wysokości 2 m nad poziomem gruntu występowały stale, jednak nie były one aż tak głębokie jak w 1996 r. Najniższa zmierzona  $T_{min}$  powietrza w lipcu na

Hali Izerskiej w latach 1934–1938 wyniosła:  $-1,5^{\circ}\text{C}$  w 1935 r., na stacji meteorologicznej IMGW w Jakuszycach w latach 1972–2013,  $-0,7^{\circ}\text{C}$  w 1976 r., a w stanowiskach pomiarowych UWr funkcjonujących od 1995 r. (Jagnięcy Potok, Chatka Górzystów na Hali Izerskiej):  $-5,5^{\circ}\text{C}$  w 1996 r. w Jagnięcym Potoku.

Najdłużej, nieprzerwanie od 1972 r., pomiary temperatury powietrza są prowadzone w stacji meteorologicznej IMGW w Jakuszycach, reprezentującej warunki zbliżone do tych panujących w centrum Gór Izerskich. Średnia roczna temperatura powietrza w obu lokalizacjach wynosi ok.  $4,0^{\circ}\text{C}$ . Natomiast średnie minimum roczne jest niższe, a średnie minima miesięczne są niemal w każdym miesiącu niższe w centrum Hali Izerskiej, reprezentowanej przez stanowisko w Jagnięcym Potoku (JP) czy w Chatce Górzystów (CG), niż w Jakuszycach (JK). Największe różnice średniej miesięcznej minimalnej temperatury powietrza pomiędzy JP czy CG a JK w cieplej porze roku wynoszą około  $1,0^{\circ}\text{C}$ , z maksimum w sierpniu i we wrześniu wynoszącym odpowiednio  $1,4^{\circ}\text{C}$  i  $1,3^{\circ}\text{C}$  (Urban 2002). Jednak w porze cieplej, w antycyklonalnym typie pogody (podczas której różnice są największe), dobowa  $T_{min}$  powietrza w centrum Hali Izerskiej jest zwykle wyraźnie niższa niż w Jakuszycach – średnio o ok.  $2,0^{\circ}\text{C} \div 2,5^{\circ}\text{C}$ . W przypadku stanowiska w Jagnięcym Potoku  $T_{min}$  jest niższa niż w Jakuszycach nawet do  $2,7^{\circ}\text{C}$ . Maksymalne różnice  $T_{min}$  pomiędzy wnętrzem Hali Izerskiej a Jakuzycami osiągają wielkość nawet  $10,0^{\circ}\text{C} \div 11,0^{\circ}\text{C}$  (Urban 2002).

Do chwili obecnej w Jakuszycach  $T_{min}$  w lipcu spadała poniżej  $0,0^{\circ}\text{C}$  tylko 5 razy w latach: 1972, 1976, 1989, 1990, 1996. W analizowanym epizodzie przymrozkowym w lipcu 1996 r. zmierzona wartość temperatury wyniosła  $-0,3^{\circ}\text{C}$ . W rozdziale 3 wspomniano, że obliczone prawdopodobieństwo wystąpienia przymrozku w centrum Hali Izerskiej o wartości  $-5,5^{\circ}\text{C}$  w lipcu wynosi 2,4%. Zatem można stwierdzić, że tak głębokie spadki temperatury powietrza w środku sezonu wegetacyjnego zdarzają się tam średnio raz na ok. 40–50 lat.

#### 4.2. Ranga lipcowego przymrozku w Górach Izerskich

Pomiary analogiczne do prowadzonych w Górach Izerskich wykonali w Szwecji Lindkvist i in. (2000). Prowadzili oni pomiary topoklimatyczne w górach południowej Szwecji, na wysokości pomiędzy 500 a 1200 m n.p.m., w okresie lipiec–sierpień 1996 r., w zbliżonych warunkach terenowych i klimatycznych. Podczas gdy na Hali Izerskiej zanotowano w lipcu 1996 roku temperaturę  $-5,5^{\circ}\text{C}$ , w Szwecji ani w dolinach V-kształtnych ani też w U-kształtnych, na wysokości ok. 650–800 m n.p.m.,  $T_{min}$  nie spadła poniżej  $-4,0^{\circ}\text{C}$  (Lindkvist et al. 2000). Fakt ten, przy uwzględnieniu adwekcji arktycznej

masy z północy, może tylko podkreślić głębokość spadku  $T_{min}$  w lipcu 1996 r. na Hali Izerskiej i siłę tego zjawiska, uwarunkowanego specyficzną morfologią Gór Izerskich.

W południowej Szwecji, w okresie czerwiec–wrzesień 1994 r. i 1995 r., najniższa temperatura powietrza na wysokości 1,5 m nad gruntem była zanotowana w lipcu  $-3,2^{\circ}\text{C}$  i w sierpniu  $-9,2^{\circ}\text{C}$  (w dniu kotłiny śródgórskiej), mimo że okresem o najniższej temperaturze minimalnej (od  $-10^{\circ}\text{C}$  do  $-15^{\circ}\text{C}$ ) związanej z radiacyjnym przymrozkiem w tym regionie jest zazwyczaj koniec września, czyli schyłek okresu wegetacyjnego (Lindkvist, Lindqvist 1997). Radiacyjne przymrozki opisane przez Lindkvista trwały przeciętnie po kilka godzin.

Należy zdawać sobie sprawę z faktu, że aby nastąpiło silne uszkodzenie i odwodnienie tkanek drzew (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula* sp.) stanowiących główny składnik lasów górskich, wystarczy w środku sezonu wegetacyjnego lekki przymrozek (od  $-2$  do  $-3^{\circ}\text{C}$ ) trwający około 3–4 godziny (Lindkvist, Lindqvist 1997; Weiser 1970). W dniach 21–23 lipca 1996 r. przymrozek na Hali Izerskiej trwał odpowiednio 6, 3 i 5 godzin.

Świerk występujący w Sudetach wykazuje dużą odporność na mrozy zimowe. W okresie zimowego spoczynku może wytrzymać temperaturę powietrza do  $-40^{\circ}\text{C}$ , lecz w okresie wzrostu jego mrozoodporność spada i sięga od  $-3^{\circ}\text{C}$  do  $-7^{\circ}\text{C}$  (Mikułowski 1997a, 1998). Późne przymrozki wiosenne powodują więcej strat niż wczesne jesienne (Giertych 1977). Jednoroczne i dwuletnie igły świerka są najbardziej wrażliwe na przymrozki w czerwcu. Gatunek ten w pierwszych latach życia rośnie stosunkowo wolno, w wieku 5 lat dorasta do 0,5 m, a wieku około 10 lat osiąga wysokość 1–2 m (Mikułowski 1997a). Do tego czasu jest on szczególnie narażony na przygruntowe przymrozki.

Według Modrzyńskiego (1989) i Mikułowskiego (1997b) skutek działania mrozu i innych czynników abiotycznych, już w stadium uprawy następuje prawie całkowita eliminacja ekotypów świerka przeniesionych z drastycznie innego środowiska.

Analiza warunków topoklimatycznych w górach wskazuje, iż często w niższych położeniach n.p.m. występują warunki niekorzystne dla wzrostu drzew, m.in. z uwagi na inwersje temperatury we wklęsłych formach terenu, prowadzące do powstawania zmrozowisk. Ze względu na wyższą średnią roczną temperaturę powietrza w niższych położeniach hipsometrycznych posadzone tam drzewka rozpoczynają wzrost wcześniej niż w położeniach wyższych, przez co są bardziej wrażliwe na szokowe oddziaływanie temperatury powietrza, zwłaszcza w obszarach, w których występują zmrozowiska (mrozowiska), niż drzewka rosnące w wyższych położeniach n.p.m. (Mikułowski 1995ab).

## 5. Podsumowanie

Scharakteryzowany epizod przymrozkowy w dniach 20–23 lipca 1996 r. uwarunkowany był specyficzną morfologią terenu centralnej części Gór Izerskich (nieckowate, wysoko położone, wylesione plateau, o minimalnym spadku podłużnym) oraz fizycznymi właściwościami masy powietrza (sucha, arktyczna, o dużej przezroczystości).

Wielogodzinne, głębokie spadki  $T_{min}$  na wysokości 2 m n.p.g. poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  w centrum Gór Izerskich, w kolejnych czterech dobach (z minimum w dn. 21.07.1996 r. wynoszącym  $-5,5^{\circ}\text{C}$ ), w pełni sezonu wegetacyjnego, spowodowały ogromne straty w gospodarce leśnej. Po tym przymrozku uszkodzenia drzewostanów we wnętrzu Gór Izerskich oszacowano nawet do 90% ich powierzchni. Przytoczona wartość temperatury minimalnej powietrza z klatki meteorologicznej wynosząca  $-5,5^{\circ}\text{C}$  jest jak do tej pory najniższą zmierzoną wartością na tym obszarze w środku lata.

Obliczone prawdopodobieństwo wystąpienia przymrozku w centrum Hali Izerskiej o wartości  $-5,5^{\circ}\text{C}$  w lipcu wynosi 2,4%. Zatem można stwierdzić, że tak głębokie spadki temperatury powietrza w pełni sezonu wegetacyjnego (środek lata) zdarzają się tam średnio raz na 40–50 lat lub rzadziej.

Wnętrze Gór Izerskich, reprezentowane przez Halę Izerską wraz z bocznymi dolinami takimi jak dolina Jągnięcego Potoku, jest jednym z najzimniejszych lub nawet najzimniejszym miejscem w Polsce pod względem absolutnych minimów temperatury powietrza w okresie wegetacyjnym.

Reasumując, można przypuszczać, że opisany w pracy epizod przymrozkowy w Górach Izerskich z lipca 1996 r. pod względem czasu wystąpienia i intensywności miał skrajnie ekstremalny charakter. Głębokie, nocne spadki  $T_{min}$  poniżej  $0^{\circ}\text{C}$  w okresie wegetacyjnym zdarzają się we wnętrzu Gór Izerskich niemal corocznie, powodując istotne szkody w uprawie i hodowli lasu.

Jak wynika z przedstawionego przeglądu zagadnień klimatycznych, botanicznych i leśnych Gór Izerskich, zbadanie warunków termicznych, szczególnie na obszarach zmrozowiskowych, może mieć znaczenie nie tylko poznawcze i wzbogacać naszą wiedzę o klimacie Sudetów i Polski, ale także praktyczne.

W warunkach górskich znajomość oddziaływania klimatu na drzewostany m.in. poprzez czynniki termiczne powinna pozwolić na optymalizowanie działań z zakresu hodowli lasu, a w efekcie końcowym na racjonalizację nakładów finansowych. Działania te mogą polegać między innymi na dostosowaniu składu gatunkowego i struktury przestrzennej odnowień, doborze właściwego rodzaju materiału sadzeniowego, a – na zmrozowiskach, tj. w strefach o najczęstszych i naj-

głębszych przymrozkach, nawet na zaniechaniu odnowień (zalesień). Ponadto należy uwzględnić odrębność klimatyczną kotlin śródgórskich i dolin, stoków oraz wierzchołków leżących na zbliżonych wysokościach nad poziomem morza.

## Podziękowania

Na wykonanie badań nie otrzymano żadnego dofinansowania.

## Literatura

- Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB. Nr 7/1996.
- BULiGL 1999. Plan Urządzenia Gospodarstwa Leśnego Nadleśnictwa Szklarska Poręba na okres od 1.I.1999 r. do 31.XII.2008 r., stan na 1.I.1999 r. Brzeg, Biuro Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Brzegu.
- BULiGL 1998. Plan Urządzenia Gospodarstwa Leśnego Nadleśnictwa Świeradów na okres od 1.I.1998 r. do 31.XII.2007 r., stan na 1.I.1998 r. Brzeg, Biuro Urządzenia Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Brzegu.
- Codzienny Biuletyn Meteorologiczny. 19–23.07.1996. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Deutsches Meteorologisches Jahrbuch. Teil II: Monats und Jahresergebnisse 1934–1938. Deutsches Reich. Reichsamt für Wetterdienst. Berlin.
- Giertych M. 1977. Genetyka, w: Świerk pospolity *Picea abies* (L.) Karst. Warszawa–Poznań, PWN, s. 287–331.
- Gil W., Zachara T. 2006. Analiza szkód od wiatru w wybranych drzewostanach świerkowych i sosnowych. *Leśne Prace Badawcze* 4: 77–99.
- Kuziemska D., 1983. O zakresie zmienności temperatury powietrza w Polsce. *Przegląd Geofizyczny* 28, 3–4: 329–343.
- Lindkvist L., Lindkvist S. 1997. Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 139–153.
- Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. 2000. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology* 102: 51–67.
- Migoń P. 1998. Rzeźba Gór Izerskich jako podłoże topoklimatycznego i ekologicznego różnicowania obszaru, w: K. Migąła, M. Sobik (red.) *Problemy klimatyczno-botaniczne Gór Izerskich*, 21–23.IX.1998, Świeradów Zdrój, s. 17.
- Mikułowski M. 1995a. Koncepcja nowych form odnawiania lasu na obszarze kleśki ekologicznej w Sudetach (II). *Las Polski*, 19: 4–6.
- Mikułowski M. 1995b. Produkcja sadzonek na różnych wysokościach nad poziomem morza. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, B, 25: 173–195.
- Mikułowski M., 1997a. Klimatyczne uwarunkowania zamierania i restytucji lasu w Sudetach Zachodnich. *Biuletyn Informacyjny Polskiego Towarzystwa Geofizycznego* 2: 3–8.
- Mikułowski M. 1997b. Problem występowania niesprzyjających warunków atmosferycznych w hodowli lasu. Biblioteczka Leśniczego, 84, Warszawa, Wyd. Świat, s. 1–16.
- Mikułowski M. 1998. Zagrożenie upraw spowodowane niską temperaturą. *Las Polski* 20: 8–9.
- Mikułowski M. 2002. Śnieg – sprawca leśnych szkód. *Głos Lasu* 2: 10–12.
- Modrzyński J., 1989. Środowiskowe przystosowania i pochodzenie świerka pospolitego (*Picea abies* (L) Karst.) w Karkonoskim Parku Narodowym. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 192: 5–98.
- Sobik M. 1998. Specyficzne cechy klimatu Gór Izerskich [w:] K. Migąła, M. Sobik (red.) *Problemy klimatyczno-botaniczne Gór Izerskich*, 21–23.IX.1998, Świeradów Zdrój, s. 29.
- Sobik M., Urban G., 2000: Warunki termiczne zlewni Kaminionka w Górach Izerskich. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geographica* 2269, 74: 143–157.
- Urban G., Bańkowski J., Sobik M. 2000. Wpływ warunków termicznych na wzrost świerka w Górach Izerskich. *Opera Corcontica* 37, 2: 532–535.
- Urban G. 2002. Warunki termiczne obszarów mrozowiskowych Gór Izerskich i ich wpływ na wzrost lasu. Praca doktorska. Zakład Meteorologii i Klimatologii. Instytut Geograficzny. Uniwersytet Wrocławski, s. 165.
- Urban G., Sobik M., Błaś M. 2005. Pośrednie i bezpośrednie znaczenie klimatu w funkcjonowaniu ekosystemów leśnych Gór Izerskich, w: Kostrzewski A. i Kolander R. (red.) *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoeosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji*. Poznań, Wydawnictwo Naukowe „Bogucki”: 575–586.
- Urban G., Gil W., Zachara T. 2011. Szkody wyrządzone przez gołoleź i śnieg na przykładzie Nadleśnictwa Herby, na tle panujących warunków pogodowych w styczniu 2010 roku. *Leśne Prace Badawcze* 3: 289–295. doi: 10.2478/v10111-011-0029-2.
- Weiser C. J. 1970. Cold resistance and injury in woody plants. *Science* 169: 1269–1278.
- Zachara T. 2006. Problem szkód w lasach powodowanych przez śnieg i wiatr oraz sposoby przeciwdziałania im. *Sylvan* 10: 56–64.
- Zachara T., Urban G., Gil W. 2007. Śniegołomy na terenie RDLP w Olsztynie – analiza zjawiska na przykładzie epizodu w dniach 01–07.11.2006 r. *Leśne Prace Badawcze*, 4: 133–142.
- Zajączkowski J. 1984. Postępowanie hodowlane a odporność drzewostanów sosnowych na szkody powodowane przez śnieg. *Sylvan*, 9: 19–27.
- Zajączkowski J. 1991. Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Warszawa, Wyd. Świat, s. 224.
- ZMiK UWr. 1995–2000. Temat badawczy „Warunki klimatyczne obszarów zurbanizowanych i górskich Polski Południowo-Zachodniej (na przykładzie Wrocławia, Karkonoszy, Masywu Śnieżnika i Gór Izerskich)”. Zakład Meteorologii i Klimatologii Instytutu Geograficznego Uniwersytetu Wrocławskiego.

## The effects of frost conditions on forest management based on the example of the July 1996 period at Hala Izerska in the Izera Mountains

Grzegorz Urban

Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute, Wrocław Branch,  
ul. Parkowa 30, 51–616 Wrocław, Poland.

Tel. +48 71 32 00 161; e-mail: grzegorz.urban@imgw.pl, urbag@poczta.onet.pl

**Abstract.** This paper presents the characteristics of a frost episode that occurred July, 20–23, 1996 in the centre of the Izera Mountains and its effects on forest management. Source data consisted of air temperature measurements originating from the author's own and archival databases of the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW), Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection (WIOŚ), University of Wrocław (UWr) and the Bureau of Forest Management and Geodesy in Brzeg (BULiGL). The intensity, time of occurrence and effects of this particular episode were extreme. The estimated probability of frost in the centre of the mountain dale Hala Izerska in July at a temperature of  $-5.5^{\circ}\text{C}$  two meters above ground level is 2.4%. Therefore, it can be stated that such a sharp decline of  $T_{\min}$  in the middle of the growing season can occur in this area once every 40–50 years. Strong, nocturnal decreases of  $T_{\min}$  below  $0^{\circ}\text{C}$  during the growing season occur in the Izera Mountains almost every year, causing significant damage to silviculture. The interior of the Izera Mountains, represented by mountain dale Hala Izerska, is one of the coldest or even the coldest site in Poland in terms of absolute minimums of air temperature during the growing season.

In the mountain areas, knowledge of the impact of climate, such as thermal factors, on tree stands enables silviculture work to be optimised, ultimately allowing funding to be rationalised. The distinct climatic conditions of mountain basins and valleys, slopes and plateaus located at similar altitudes need to be considered.

**Key words:** frost, growing season, damage to forests, the Izera Mountains

### 1. Introduction

Climatic conditions impact forest ecosystems in many ways. The main meteorological factors causing abiotic injury to forests include: strong wind, heavy snowfall, drought, extreme drops in air temperature, and icing or hard rime.

The issue of forest damage from atmospheric factors has been presented in many studies (Zajączkowski 1984, 1991; Mikułowski 1998, 2002, Urban 2002, Urban et al. 2000, 2005, 2011; Zachara 2006; Gil and Zachara 2006; Zachara et al. 2007). In forests, aside from the most common and most spectacular damage caused by wind and snow, other factors also result in significant

economic loss in forestry, such as when air temperatures drop below  $0^{\circ}\text{C}$  during the growing season.

Extreme temperatures are an important factor affecting the ecological conditions in mountain ecosystems, particularly the lowest temperature occurring at different times of the year. Plants, including relatively resistant spruce trees, can suffer damage from low air temperatures during the growing season quite quickly – within several hours. This particular type of weather is formed by high-pressure systems, with radiational cooling of the ground and lower atmosphere layers. Such weather conditions are associated with specific synoptic situations and terrain morphology, which will be described later in this paper.

While taking weather measurements in 1995 in the Izera Mountains, the air temperature dropped many times below 0°C at a height of 2 m above ground level.

One of the most significant summer frost occurrences, in terms of damage to reforestation work in the Izera Mountains, was the episode of July 20–23, 1996. In view of its extraordinary character (intensity) in terms of the sharp air temperature drop and time of year (middle of the growing season), this frost episode should be fully documented and related to areas beyond the Izera Mountains.

## 2. Study area

The Izera Mountains comprise the western extremity of the Sudetes Mountains, characterised by an exceptionally extensive area of flat-topped mountains over 800 m above sea level. In contrast to other Sudetes ranges, the higher regions of the Izera Mountains are not dissected by river valleys, which are wide and shallow here, and in many intermontane locations, have the characteristics of an extensive, high-altitude intermontane basin, as exemplified by the vast mountain dale Hala Izerska. The Hala Izerska occupies an area of approximately 400 ha and is found at an altitude of 820–880 m above sea level (ASL). The morphology of the terrain and the Jagnięcy Potok (JP) weather station are shown in Photograph 1.

The specific features of the Izera Mountain terrain (a more detailed description is provided below) favour exceptionally strong and frequent thermal inversions, which are related to intense frosts that are particularly dangerous for tree stands during the growing season.

After the frost of July 1996, more than 50% of spruce plantings were damaged in the forests of Świeradów and Szklarska Poreba, and in extreme cases – at intermountain valley floors – up to 90% (BULiGL 1998, 1999, photographs 2 and 3). The inversion layer with a very low ambient  $T_{\min}$  was so intense that the apical shoots of spruce were damaged even at a height of 2 m above ground level. Damage also extended to the outer crown shoots of mature (decades old) spruce trees, which were already dwarfed (bushy) due to the almost annual damage caused by frost.

Intense minimum air temperature drops below 0°C in the middle of summer are very disruptive to the vital functions of forest ecosystems. Damaged and weakened tree stands are more susceptible to the effects of biotic factors, which in turn can lead to complete die-off.



**Photograph 1.** Radiation fog at mountain dale Hala Izerska, the Jagnięcy Potok measurement station (825 m), view towards direction North-North-West (photograph by G. Urban; June 4, 1999).



**Photographs 2 and 3.** Damage to spruce trees after the frost episode of July 20–23, 1996, at mountain dale Hala Izerska in the Izera Mountains, near the estuary of Jagnięcy Potok (photograph by M. Sobik, August 1, 1996).

## 3. Source data and methods

The analysis was based on the results of measurements of air temperature I collected in the Izera Mountains for a study conducted by the Department of Meteorology and Climatology, University of Wrocław (ZMiK UWr 1995–2000). In addition, meteorological data for July 1996 were used from the weather station of the Institute of Meteorology and Water Management (IMGW) and from the Voivodeship Inspectorate for Environmental Protection (WIOŚ) in Jelenia Góra (JG), located in the Izera Mountains and their vicinity. Data from these stations provided the situational background and the opportunity to verify and supplement my own measurements. The spatial distribution of the measurement stations used in this study and the characteristics of their locations are illustrated in Figure 1 and Table 1.

Analysis of the barometric and weather conditions in Europe and Poland, with particular emphasis on the Izera Mountains region, was carried out on the basis of:

synoptic maps for the period of July 19–22, 1996, daily IMGW meteorological bulletins for July 19–23, 1996, the National Hydrological and Meteorological Service bulletin of IMGW for July 1996, diagrams and data from weather balloon soundings for Wrocław and Prague, and information from the following websites: [www.knmi.nl](http://www.knmi.nl), [www.imgw.pl](http://www.imgw.pl), [www.chmi.cz](http://www.chmi.cz), [www.weather.uwyo.edu](http://www.weather.uwyo.edu).

Indispensable data on the extent of damage in the tree stands were obtained from the Bureau of Forest Management and Geodesy in Brzeg (BULiGL, 1998 and 1999).

I defined the probability of a frost occurrence in July at mountain dale Hala Izerska with a daily  $T_{\min}$  equal to  $-5.5^{\circ}\text{C}$ , the lowest recorded temperature during the frost episode under study. The probability was calculated based on available July daily  $T_{\min}$  data for four years: 1998, 1999, 2004 and 2006. It was found that the level of  $T_{\min}$  is subject to a normal distribution with the following parameters: mean equal to  $6.68^{\circ}\text{C}$  and a standard deviation equal to  $3.842^{\circ}\text{C}$ . This was established with the use of the Chi-square test of compatibility. The calculated probability was 2.4%, providing a repeatability rate for the phenomenon of every 40–50 years.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Meteorological and morphological conditions of the weather episode of July 20–23, 1996

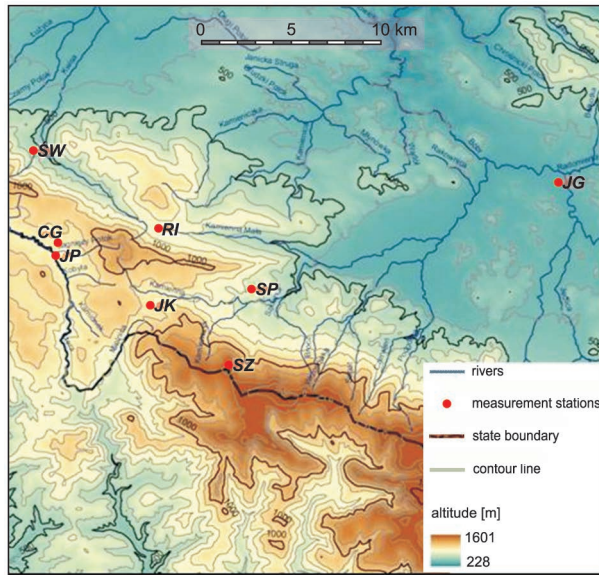
On July 20–23, 1996, Poland was in an area of high pressure with a North-East to South-West axis. An arctic air mass (AAM), characterised by low relative humidity and very clear skies, was associated with this baric system (with a very weak horizontal gradient of atmospheric pressure) and fostered intense thermal radiation from the ground, consequently resulting in very intense radiational frost.

The nature of the air mass was well reflected in data retrieved from the weather balloon above Wrocław on July 21, 1996 (Table 2). The data shows a barometric pressure of 925 hPa at 875 m ASL, which is the same height as the altitude of the mountain dale Hala Izerska; the air mass was relatively dry (relative humidity of 57%, a saturation deficit of 5.03 hPa, determined from psychrometric tables) with a wind speed of 4 m/s from the North (Table 2).

**Table 1.** Measurement stations in the Izera Mountains and surrounding area

Location of weather station	Abbreviation	Altitude [m ASL]	Operator*	Type of terrain
Jelenia Góra	JG	341	IMGW	Concave landform, JG Basin floor
Świeradów Zdrój	ŚW	543	IMGW	Convex landform, hilltop with a North-East exposure, about 80 m above the Kwisa Valley floor
Szklarska Poręba	SP	650	IMGW	Concave landform, lower N portion of Szrenica slope, right side of the Kamińczyk Valley, about 20 m above the Kamińczyk stream bed
Rozdroże Izerskie	RI	770	WIOŚ	Convex landform, slope just above a broad open mountain pass connecting Wysoki Ridge and Kamienicki Ridge
Jagnięcy Potok	JP	825	ZMiK UWr	Concave landform, flood plain at mountain dale Hala Izerska, left bank of the Izera and left bank of the Jagnięcy Potok, about 100 m from these watercourses, about 3–4 m above the water level of the Izera, open, grassy area
Chatka Górzystów na Hali Izerskiej	CG	840	ZMiK UWr	Concave landform, lower part of the slope of the Izera Valley, open and grassy
Jakuszyce	JK	860	IMGW	Concave landform, in the vicinity of a broad mountain pass, right bank of the Kamienna River, flood plain
Szrenica	SZ	1332	ZMiK UWr	Convex landform, upper part of the slope WSW

\*IMGW – Institute of Meteorology and Water Management, WIOŚ – Voivodeship Inspectorate of Environmental Protection, ZMiK UWr – Department of Meteorology and Climatology, University of Wrocław.



**Figure 1.** Location of measurement stations in the area. Key to abbreviations is presented in Table 1.

A vertical sounding of the atmosphere was also performed above Prague (Czech Republic, situated at an altitude of 305 m ASL on the other side of the Iżera Mountains). It showed that the humidity parameters of the air mass at a barometric pressure of 925 hPa were similar to the readings from Wrocław (the saturation deficit determined from psychrometric tables reached 6.2 hPa). The mass was therefore relatively dry, which helped to radiate heat from the ground.

On July 21, 1996, the middle of the growing season, the recorded air temperature at a height of 2 m above ground level was  $-5.5^{\circ}\text{C}$  at the JP measurement station, and below  $0^{\circ}\text{C}$  for the next 4 days. During those same days, in the stations where conditions were conducive to the formation of extended frosts, such as Jakuszyce (JK) or JG, minimum temperatures were a few degrees higher. However, the  $T_{\min}$  at JK on July 21, 1996, fell below  $0^{\circ}\text{C}$  and amounted to  $-0.3^{\circ}\text{C}$  (Figure 2).

An all-night radiational thermal inversion marked the course of this weather episode, clearly visible for the next four nights, between stations JP and Szrenica (SZ). The inversion also occurred between stations JG and SZ, but was of slightly shorter duration and weaker because it only lasted for a few hours of the last 3 nights – for 5, 2 and 4 hours respectively. The thermal inversion disappeared in the morning hours, while the decrease in air temperature as the height ASL increased was similar to the dry adiabatic lapse rate, that is, approximately

**Table 2.** Data from a weather balloon above Wrocław on July 21, 1996, at the hour of 00:00 Coordinated Universal Time (UTC) [source: [www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html](http://www.weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html)]

P	H	T	Td	U	Mixr	V	L
[hPa]	[m ASL]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	[%]	[g/kg]	[m/s]	[ $0-360^{\circ}$ ]
1012.0	119	12.2	6.2	67	5.91	0	0
1001.0	211	11.8	6.8	71	6.23	5	10
996.0	253	12.8	6.8	67	6.26	7	15
991.0	296	13.8	6.8	63	6.29	8	40
985.0	347	13.4	6.3	62	6.12	8	60
<b>925.0</b>	<b>875</b>	<b>9.4</b>	<b>1.4</b>	<b>57</b>	<b>4.60</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
903.0	1073	7.7	0.7	61	4.48	3	40
850.0	1572	3.4	-1.0	73	4.20	5	355
811.0	1947	0.6	-2.8	78	3.85	5	25
792.0	2136	-0.8	-3.7	81	3.69	5	10
750.0	2570	-4.1	-5.8	88	3.32	6	40
723.0	2862	-6.3	-7.2	93	3.09	5.5	26
719.0	2960	-6.7	-11.6	68	2.20	5.5	24
707.0	3038	-4.5	-25.5	18	0.68	5	17
703.0	3082	-4.6	-25.6	18	0.68	5	15
700.0	3116	-4.7	-25.7	18	0.68	6	5

Key: P – atmospheric pressure, H – altitude, T – air temperature, Td – dew point temperature, U – humidity, Mixr – mixing ratio of water vapor, V – wind velocity, L – wind direction

$1.0^{\circ}\text{C}$  per 100 m of increase in altitude (Figure 2).

It is worth noting that at the Rozdroże Iżerskie (RI), also located in the interior of the Iżera Mountains and only approximately 50 m lower than the JP site, the minimum temperature never fell below  $+5.0^{\circ}\text{C}$ . On July 21, 1996, it reached a temperature of  $+5.4^{\circ}\text{C}$ . It is clear that the terrain influenced the distribution of minimum air temperature. In the case of JP, the flat-bottomed intermontane basin favoured the formation of stagnant cold air, while the mountain pass at RI enabled the cold air to flow out and down the valley.

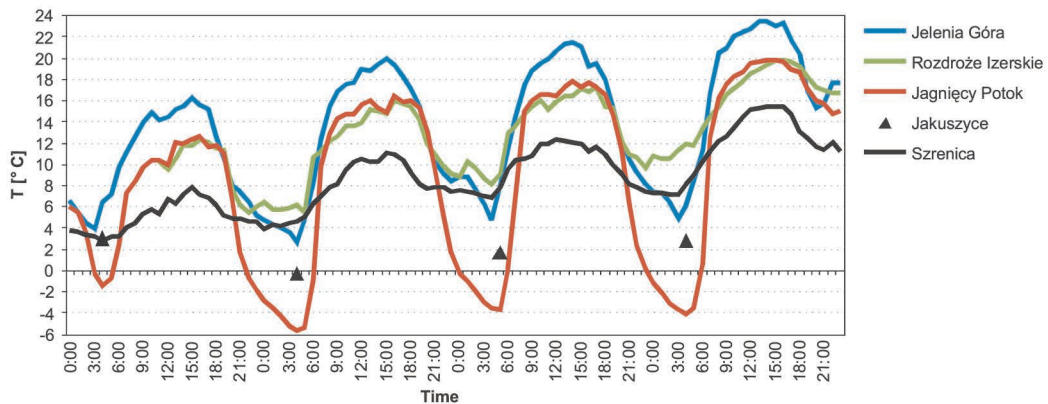
Based on the relationship of the minimum air temperature at heights of 2 m and 0.05 m above ground level with anticyclonic circulation at the Chatka Górzystów (CG) site of mountain dale Hala Iżerska, the  $T_{\min}$  at ground level on July 21, 1996, could have reached even  $-10.0^{\circ}\text{C}$  (Urban 2002). The level of minimum air temperature recorded for July 20–23, 1996, at other IMGW measurement stations in Poland never dropped as low as the values obtained from the centre of the mountain dale

Hala Izerska at the JP station (Table 3). Even at the JG basin floor, at the JG synoptic station, where the absolute minimum air temperature of  $-36.9^{\circ}\text{C}$  was recorded in Poland after World War II (Kuziemska 1983), the  $T_{\min}$  for that day was  $+3.0^{\circ}\text{C}$  (Table 3).

The key features of the Izero Mountain terrain result in different climatic conditions than in the other ranges of the Sudetes Mountains. These include: steep slopes of high relative altitudes to the west and north; in the central part of the mountains, the presence of extensive, flat-bottomed depressions with very gradual decreases in altitude

along their longitudinal axes, which in many places resemble broad intermontane basins. The enclosed depressions at altitudes of over 750 m ASL are a unique part of the Sudetes Mountain terrain (Migoń 1998).

During anticyclonal radiational weather conditions, the depressions in the higher regions of flat-topped mountains are places where cold air collects as it flows from the surrounding slopes, creating stagnant pools. These cold air pools play a significant role in shaping the ecology of plant communities. An additional factor favouring the development of the intensive radiational



**Figure 2.** The daily course of air temperatures at selected measurement stations for July 20–23, 1996. Key to abbreviations is presented in Table 1.

**Table 3.** Minimal air temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ] at a height of 2 m ( $T_{\min}$ ) and 0.05 m ( $T_{\min+5}$ ) above ground level at selected IMGW synoptic stations in Poland for July 20–23, 1996 [source: IMGW Daily Meteorological Bulletin]

Stations	July 20, 1996	July 21, 1996	July 22, 1996	July 23, 1996
	$T_{\min}/T_{\min+5}$	$T_{\min}/T_{\min+5}$	$T_{\min}/T_{\min+5}$	$T_{\min}/T_{\min+5}$
Białystok	10/9	7/6	8/6	8/3
Jelenia Góra	4/1	3/1	5/2	5/2
Kasprowy Wierch	0/×	-1/×	4/×	1/×
Kłodzko	6/3	4/2	6/4	6/3
Lębork	13/13	12/10	4/1	7/4
Przemyśl	10/9	9/8	8/7	9/7
Resko	5/1	6/3	6/3	8/6
Siedlce	10/10	6/5	6/4	5/3
Suwałki	10/9	6/4	7/5	8/2
Śnieżka	1/×	2/×	5/×	6/×
Wrocław	8/6	6/3	9/5	7/4
Zakopane	7/7	4/3	4/4	4/2

× – measurements not taken

inversion was the extensive deforestation of the mountain uplands and slopes as a result of extremely detrimental environmental conditions. This facilitated the gravitational flow of cold air into the valley. Of equal importance is also the lack of settlements in the Izera Mountain interior, which in other areas – through emissions of home heating systems – helped to reduce nocturnal heat loss of far infrared radiation (Sobik 1998).

These factors cause frequent and intense thermal inversions, which, in the warm part of the year, are limited to nighttime and relate primarily to minimum temperature ( $T_{\min}$ ). During the cold part of the year, such temperature inversions are much more frequent, stronger and last longer; aside from the  $T_{\min}$ , they also include mean daily temperature ( $T_i$ ), and even the average monthly minimum temperature and monthly average, and occasionally also the maximum temperature  $T_{\max}$  (Sobik and Urban 2000, Urban 2002). Due to the relatively small horizontal dimensions of the intermontane depressions, of which mountain dale Hala Izerska is an example, the air temperature is further reduced by the absence of the warming influence of foehns, important in the formation of thermal conditions on the northern slopes of the Karkonosze and the Izera Mountains, as well as the neighbouring, broad JG Valley.

In order to verify the frequency and intensity of temperature drops below  $T_{\min}$  of  $0.0^{\circ}\text{C}$  in the middle of the growing season, an analysis was performed of available meteorological data near the centre of the Izera Mountains (1934–1938 German Meteorological Yearbook; IMGW, University of Wrocław). Temperature drops below  $T_{\min}$  of  $0.0^{\circ}\text{C}$  at a height of 2 m above ground level occurred constantly in this area, but were not nearly as intense as in 1996. The lowest measured  $T_{\min}$  in July at mountain dale Hala Izerska from the 1934–1938 records was  $-1.5^{\circ}\text{C}$  in 1935; from 1972 to 2013 at the IMGW JK weather station, it was  $-0.7^{\circ}\text{C}$  in 1976; and at the University of Wrocław measurement stations operating since 1995 (JP, Chatka Górzystów at mountain dale Hala Izerska),  $-5.5^{\circ}\text{C}$  in 1996 at JP.

Temperature records have been recorded over the longest period of time – since 1972 – at the IMGW JK weather station, which has conditions similar to those in the centre of the Izera Mountains. The average annual air temperature in both locations is approximately  $4.0^{\circ}\text{C}$ . However, the average annual minimum temperature is lower, and the average monthly minimums are lower in almost every month in the centre of the mountain dale Hala Izerska, as recorded by the JP or CG measurement stations. The largest warm season dif-

ferences in mean monthly minimum air temperature between JP or CG and JK is about  $1.0^{\circ}\text{C}$ , with a maximum in August and September of  $1.4^{\circ}\text{C}$  and  $1.3^{\circ}\text{C}$  respectively (Urban 2002). However, when anticyclonal weather occurs in the warm season (during which the differences are greatest), the daily  $T_{\min}$  in the centre of the mountain dale Hala Izerska is usually distinctly lower than in JK – on average by approx.  $2.0^{\circ}\text{C}$  to  $2.5^{\circ}\text{C}$ . In the case of JP, the  $T_{\min}$  is lower than in JK by up to  $2.7^{\circ}\text{C}$ . The maximum difference between the interior of mountain dale Hala Izerska and the JK station even reaches  $10.0^{\circ}\text{C}$ – $11.0^{\circ}\text{C}$  (Urban 2002).

To date, the  $T_{\min}$  recorded at JK in July fell below  $0.0^{\circ}\text{C}$  only five times, in 1972, 1976, 1989, 1990, 1996. During the analysed frost episode of July 1996, the temperature measured was  $-0.3^{\circ}\text{C}$ . In section 3, I noted that the calculated probability of a July frost in the centre of mountain dale Hala Izerska with a value of  $-5.5^{\circ}\text{C}$  is 2.4%. Therefore, it can be concluded that such intense drops in air temperature in the middle of the growing season occur there approximately once every 40–50 years.

#### 4.2. The significance of the July 1996 frost in the Izera Mountains

Lindkvist et al. (2000) performed similar measurements in Sweden as those conducted in the Izera Mountains. They conducted topoclimatic measurements in the mountains of southern Sweden at an altitude of between 500 and 1200 m ASL in July–August 1996 in similar terrain and climate. While a temperature of  $-5.5^{\circ}\text{C}$  was recorded at mountain dale Hala Izerska in July 1996, the  $T_{\min}$  in Sweden did not fall below  $-4.0^{\circ}\text{C}$ , either in V-shaped or U-shaped valleys at a height of approx. 650–800 m ASL (Lindkvist et al. 2000). This fact, taking into account the advection of the arctic air mass from the north, can only emphasize the depth of the  $T_{\min}$  drop in July 1996 at mountain dale Hala Izerska and intensity of this phenomenon, conditioned by the specific morphology of the Izera Mountains.

In southern Sweden, between June and September of 1994 and 1995, the lowest air temperature at 1.5 m above ground level was recorded in July at  $-3.2^{\circ}\text{C}$  and in August at  $-9.2^{\circ}\text{C}$  (at an intermontane valley floor), although the period of the lowest minimum temperature (from  $-10^{\circ}\text{C}$  to  $-15^{\circ}\text{C}$ ) associated with radiation frost in this region is usually at the end of September, the end of the growing season (Lindkvist and Lindqvist 1997). Radiation frosts described by Lindkvist lasted an average of a few hours.

It should be noted that only a light frost (from  $-2$  to  $-3^{\circ}\text{C}$ ) lasting about 3–4 hours in the middle of the growing season is needed to seriously damage and dehydrate the tissues of the trees constituting the main species of mountain forests (*Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Betula sp.*) (Lindkvist and Lindqvist, 1997; Weiser, 1970). On July 21, 22 and 23, 1996, the frost at mountain dale Hala Izerska lasted 6, 3 and 5 hours, respectively.

The spruce trees growing in the Sudetes Mountains are highly resistant to winter frost. During winter dormancy, they can withstand air temperatures of up to  $-40^{\circ}\text{C}$ , but during the growing season, they are not so hardy and their resistance drops to between  $-3^{\circ}\text{C}$  and  $-7^{\circ}\text{C}$  (Mikułowski 1997a, 1998). Late spring frosts cause more damage than those in early autumn (Giertych 1977). One- and two-year-old spruce needles are most susceptible to frost in June. This species grows relatively slowly in its first years of life, reaching a height of 0.5 m at 5 years of age and 1–2 m at about 10 years of age (Mikułowski 1997a). Until then, it is particularly vulnerable to ground-level frosts.

According to Modrzyński (1989) and Mikułowski (1997b), frost and other abiotic factors almost completely eliminate spruce ecotypes already at the stage of cultivation that were transported from very different environment.

The analysis of topoclimatic conditions in mountains shows that lower altitudes ASL are often unfavourable for tree growth, due to, among other reasons, temperature inversions that lead to the formation of cold air pools in depressed terrain. Due to the higher average annual air temperature at lower hypsometric altitudes, trees planted there start to grow earlier than at higher altitudes, and thus are more sensitive to dramatic changes in air temperature, especially in areas where there is formation of cold air pools, than trees growing at higher locations (Mikułowski 1995ab).

## 5. Summary

The frost episode of July 20–23, 1996, presented in this paper was conditioned by the specific morphology of the terrain in the central part of the Izer Mountains (trough-like, high altitude deforested flat-topped mountains, with minimal decrease in longitudinal drop of altitude) and the physical properties of the air mass (dry, Arctic, very clear skies).

The extreme decline of  $T_{\min}$  below  $0^{\circ}\text{C}$  at a height of 2 m above ground level in the centre of the Izer Mountains over many hours, occurring over 4 days and nights (with

a minimum on July 21, 1996, of  $-5.5^{\circ}\text{C}$ ) at the height of the growing season resulted in huge losses in managed forests. It is estimated that this frost episode damaged about 90% of the tree stand area in the interior of the Izer Mountains. The minimum temperature measured at the weather station of  $-5.5^{\circ}\text{C}$  is thus far the lowest recorded value for this area in the middle of summer.

The calculated probability of a  $-5.5^{\circ}\text{C}$  frost in the centre of mountain dale Hala Izerska in July is 2.4%. Therefore, it can be concluded that such an intense drop in air temperature at the height of the growing season (middle of summer) occurs at this site on average once every 40–50 years or less.

The interior of the Izer Mountains, represented by mountain dale Hala Izerska, together with adjacent valleys, such as JP, is one of the coldest or even the coldest site in Poland in terms of absolute minimums of air temperature during the growing season.

In summary, the July 1996 frost episode in the Izer Mountains was an especially extreme event in terms of the time of occurrence and intensity. Extreme nocturnal drops of  $T_{\min}$  below  $0^{\circ}\text{C}$  during the growing season occur in the interior of the Izer Mountains almost every year, causing significant damage to silviculture.

This review of the climatic, botanical and forestry issues of the Izer Mountains shows that studying thermal conditions, especially in areas prone to cold air pooling, may not only have cognitive significance in enriching our knowledge about the climate of the Sudetes Mountain and Poland, but may also have practical application.

Knowledge about the impact of climate on tree stands in mountain areas, including thermal factors, should enable silviculture work to be optimised, and ultimately, allow funding to be rationalised. This may include such activities as adjusting species composition and the spatial structure of stock renewal, selecting the right kind of planting stock, and – in areas threatened by summer frosts, that is, in the zones of the most frequent and coldest frosts, even abandoning afforestation. Most importantly, the distinct climatic conditions of intermontane basins and valleys, slopes and plateaus located at similar altitudes must be taken into consideration.

## Acknowledgements

This research received no specific grant from any funding agency in the public, commercial or not-for-profit sectors.

## References

- Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej IMGW-PIB. Nr 7/1996.
- BULiGL 1999. Plan Urządzenia Gospodarstwa Leśnego Nadleśnictwa Szklarska Poręba na okres od 1.I.1999 r. do 31.XII.2008 r., stan na 1.I.1999 r. Brzeg, Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Brzegu.
- BULiGL 1998. Plan Urządzenia Gospodarstwa Leśnego Nadleśnictwa Świeradów na okres od 1.I.1998 r. do 31.XII.2007 r., stan na 1.I.1998 r. Brzeg, Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Brzegu.
- Codzienny *Biuletyn Meteorologiczny*. 19-23.07.1996. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa.
- Deutsches Meteorologisches Jahrbuch. Teil II: Monats und Jahresergebnisse 1934–1938. Deutsches Reich. Reichsamt für Wetterdienst. Berlin.
- Giertych M. 1977. Genetyka, in: Świerk pospolity *Picea abies* (L.) Karst. Warszawa–Poznań, PWN, p. 287–331.
- Gil W., Zachara T. 2006. Analiza szkód od wiatru w wybranych drzewostanach świerkowych i sosnowych [Analysis of wind damages in spruce and pine stands]. *Leśne Prace Badawcze* 4: 77–99.
- Kuziemska D., 1983. O zakresie zmienności temperatury powietrza w Polsce. *Przegląd Geofizyczny* 28, 3-4: 329–343.
- Lindkvist L., Lindkvist S. 1997. Spatial and temporal variability of nocturnal summer frost in elevated complex terrain. *Agricultural and Forest Meteorology* 87: 139–153.
- Lindkvist L., Gustavsson T., Bogren J. 2000. A frost assessment method for mountainous areas. *Agricultural and Forest Meteorology* 102: 51–67.
- Migoń P. 1998. Rzeźba Gór Izerskich jako podłoże topoklimatycznego i ekologicznego zróżnicowania obszaru, in: K. Migąła, M. Sobik (eds.) *Problemy klimatyczno-botaniczne Gór Izerskich*, 21–23.IX.1998, Świeradów Zdrój, p. 17.
- Mikułowski M. 1995a. Koncepcja nowych form odnawiania lasu na obszarze kłęski ekologicznej w Sudetach (II). *Las Polski*, 19: 4–6.
- Mikułowski M. 1995b. Produkcja sadzonek na różnych wysokościach nad poziomem morza. *Prace Instytutu Badawczego Leśnictwa*, B, 25: 173–195.
- Mikułowski M., 1997a. Klimatyczne uwarunkowania zamierania i restytucji lasu w Sudetach Zachodnich. *Biuletyn Informacyjny Polskiego Towarzystwa Geofizycznego* 2: 3–8.
- Mikułowski M. 1997b. Problem występowania niesprzyjających warunków atmosferycznych w hodowli lasu. *Biblioteczka Leśniczego*, 84, Warszawa, Wyd. Świat, p. 1–16.
- Mikułowski M. 1998. Zagrożenie upraw spowodowane niską temperaturą. *Las Polski* 20: 8–9.
- Mikułowski M. 2002. Śnieg – sprawca leśnych szkód. *Głos Lasu* 2: 10–12.
- Modrzyński J., 1989. Środowiskowe przystosowania i pochodzenie świerka pospolitego (*Picea abies* (L.) Karst.) w Karkonoskim Parku Narodowym. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 192: 5–98.
- Sobik M. 1998. Specyficzne cechy klimatu Gór Izerskich, in: K. Migąła, M. Sobik (ed.) *Problemy klimatyczno-botaniczne Gór Izerskich*, 21–23.IX.1998, Świeradów Zdrój, p. 29.
- Sobik M., Urban G., 2000: Warunki termiczne zlewni Kamiönka w Górach Izerskich. *Acta Universitatis Wratislaviensis, Studia Geographica* 2269, 74: 143–157.
- Urban G., Bańkowski J., Sobik M. 2000. Wpływ warunków termicznych na wzrost świerka w Górach Izerskich [Influence of thermic conditions on spruce stands in the Izera Mountains]. *Opera Corcontica* 37, 2: 532–535.
- Urban G. 2002. Warunki termiczne obszarów mrozowiskowych Gór Izerskich i ich wpływ na wzrost lasu. Praca doktorska. Zakład Meteorologii i Klimatologii. Instytut Geograficzny. Uniwersytet Wrocławski, p. 165.
- Urban G., Sobik M., Błaś M. 2005. Pośrednie i bezpośrednie znaczenie klimatu w funkcjonowaniu ekosystemów leśnych Gór Izerskich, in: Kostrzewski A. i Kolander R. (eds.) *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geosystemów Polski w warunkach zmian klimatu i różnokierunkowej antropopresji*. Poznań, Wydawnictwo Naukowe „Bogucki”: 575–586.
- Urban G., Gil W., Zachara T. 2011. Szkody wyrządzone przez gołoledź i śnieg na przykładzie Nadleśnictwa Herby, na tle panujących warunków pogodowych w styczniu 2010 roku [Assessment of damage to trees in the Herby Forestry District caused by glazed frosts and snow during severe weather in January 2010]. *Leśne Prace Badawcze* 3: 289–295.
- Weiser C. J. 1970. Cold resistance and injury in woody plants. *Science* 169: 1269–1278.
- Zachara T. 2006. Problem szkód w lasach powodowanych przez śnieg i wiatr oraz sposoby przeciwdziałania im [Damage to forests caused by snow and wind and the way of counteracting it]. *Sylvan* 10: 56–64.
- Zachara T., Urban G., Gil W. 2007. Śniegołomy na terenie RDLP w Olsztynie – analiza zjawiska na przykładzie epizodu w dniach 01–07.11.2006 r. *Leśne Prace Badawcze*, 4: 133–142.
- Zajączkowski J. 1984. Postępowanie hodowlane a odporność drzewostanów sosnowych na szkody powodowane przez śnieg. *Sylvan*, 9: 19–27.
- Zajączkowski J. 1991. Odporność lasu na szkodliwe działanie wiatru i śniegu. Warszawa, Wyd. Świat, p. 224.
- ZMiK UW. 1995–2000. Temat badawczy. „Warunki klimatyczne obszarów zurbanizowanych i górskich Polski Południowo-Zachodniej (na przykładzie Wrocławia, Karkonoszy, Masywu Śnieżnika i Gór Izerskich)”. Zakład Meteorologii i Klimatologii Instytutu Geograficznego Uniwersytetu Wrocławskiego.