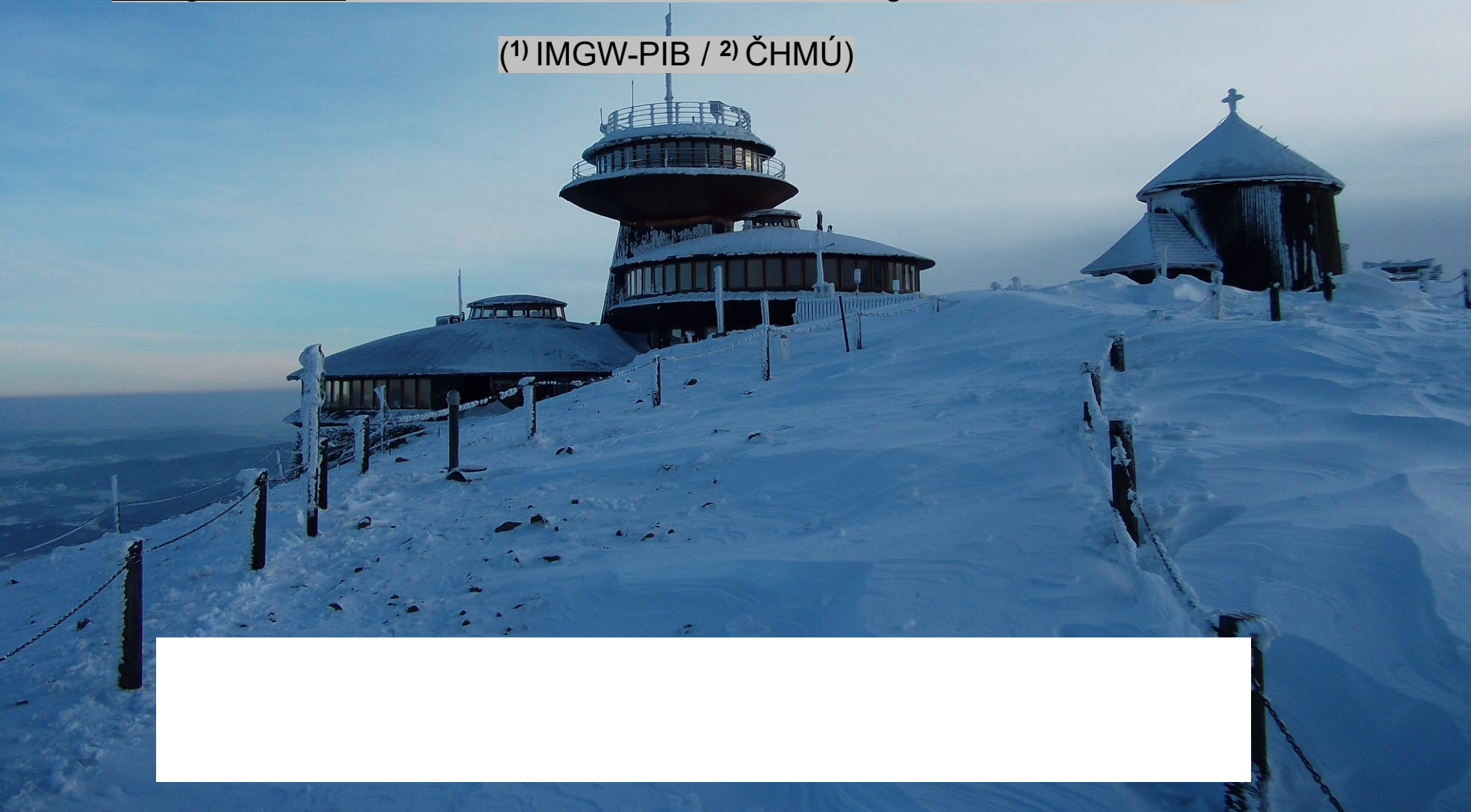


**Przyczyny skrócenia czasu zalegania pokrywy śnieżnej
w Sudetach Zachodnich w świetle współczesnej zmiany klimatu**

**Reasons for shortening of snow cover duration in the
Western Sudetes in the light of contemporary climate change**

Grzegorz Urban¹⁾, Dáša Richterová²⁾, Stanislava Kliegrová²⁾, Ilona Zusková²⁾

(¹⁾ IMGW-PIB / (²⁾ ČHMÚ)



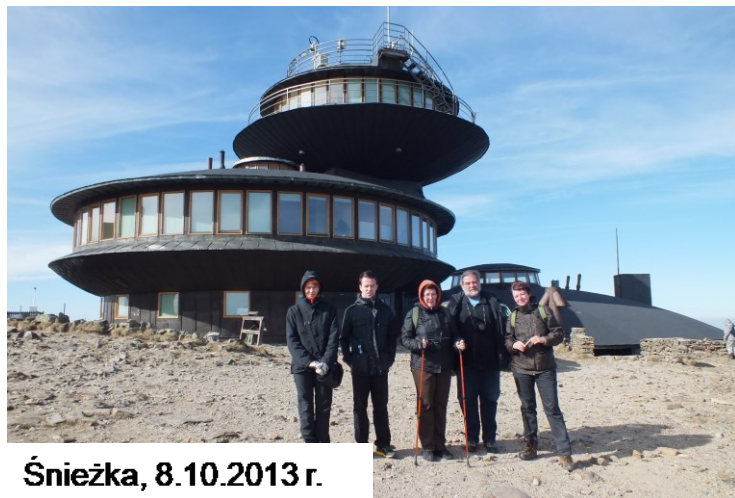
- *Rosnąca globalna temperatura powietrza w XX i XXI wieku spowodowała redukcję kriosfery (IPCC 2013, 2021).*
- *Pokrywa śnieżna sukcesywnie się zmniejsza zarówno na obszarach nizinnych jak i w górach (Marty 2008; Durand et al. 2009; Valt and Cianfarra 2010; Park et al. 2012; Pederson et al. 2013; Xu et al. 2015; IPCC 2013, 2021).*





Praca jest kontynuacją cyklu artykułów dotyczących pokrywy śnieżnej w Karkonoszach i Górach Izerskich, w tym:

- Urban G., Richterová D., Kliegrová S., Zusková I., Pawliczek P. (2018). ***Winter severity and snowiness and their multiannual variability in the Karkonosze Mountains and Jizera Mountains.***
Theoretical and Applied Climatology, 134:221–240. DOI: 10.1007/s00704-017-2270-y.
- Urban G., Richterová D., Kliegrová S., Zusková I. (2019). ***Durability of snow cover and its long-term variability in the Western Sudetes Mountains.***
Theoretical and Applied Climatology, 137, s. 2681–2695. DOI: 10.1007/s00704-019-02770-7.





Společná měření a integrace 😊 😊 😊

Hipotezy badawcze:

- *długoterminowy wzrost temperatury powietrza, zmiany w opadach atmosferycznych i ich strukturze (zmniejszenie udziału fazy stałej), wzrost usłonecznienia oraz zmiany w cyrkulacji atmosferycznej - modyfikowanej na barierze orograficznej, którą tworzą Sudety, powodują zmniejszenie grubości i skrócenie czasu zalegania pokrywy śnieżnej,*
- *na skrócenie czasu zalegania pokrywy śnieżnej większy wpływ mają zmiany w jej datach końca niż w datach początku,*
- *makro-ekspozycja stoków jest istotnym czynnikiem różnicującym warunki śniegowe.*

Table 1. The meteorological stations used in the study. 17 stations: 8 IMGW–PIB, 8 CHMI, 1 – UW r.

Station	H [m a.s.l.]	Affiliation	Morphological form	Climatic zone [according to Hess et al. 1980]	Macro-exposure
Śnieżka	1603	IMGW–PIB	Uncovered peak in the Karkonosze Mts	Very cold	N-S (uncovered peak)
Szrenica	1331	UWr	Slope below a peak on plateau in the Karkonosze Mts	Very cold	S
Benecko 1	880	CHMI	slope in the Karkonosze Mts	Moderately cold	S
Jakuszyce	860	IMGW–PIB	mountain pass between Karkonosze and Izera Mts	Moderately cold	S
Benecko 2	790	CHMI	slope in the Karkonosze Mts	Moderately cold	S
Bedřichov	777	CHMI	slope in the Izera Mts	Moderately cold	S
Desná-Souš	772	CHMI	shallow valley in the Izera Mts	Moderately cold	S
Karpacz 1	720	IMGW–PIB	slope in the Karkonosze Mts	Moderately cold	N
Harrachov	675	CHMI	valley in the Izera Mts	Moderately cold	S
Vysoké nad Jizerou	670	CHMI	slope in the Izera Mts	Moderately cold	S
Przesieka	650	IMGW–PIB	slope in the Karkonosze Mts	Moderately cold	N
Szklarska Poręba	645	IMGW–PIB	slope in the Karkonosze Mts	Moderately cold	N
Karpacz 2	580	IMGW–PIB	slope in the Karkonosze Mts	Moderately warm	N
Horní Maršov	565	CHMI	lower area of Karkonosze Mts	Moderately warm	S
Świeradów Zdrój	543	IMGW–PIB	slope in the Izera Mts	Moderately warm	N
Hejnice	396	CHMI	foothills of the Izera Mts	Moderately warm	N
Jelenia Góra	342	IMGW–PIB	dale in the Karkonosze Mts	Moderately warm	N

Basic research period: XI-IV 1961/62–2020/21.

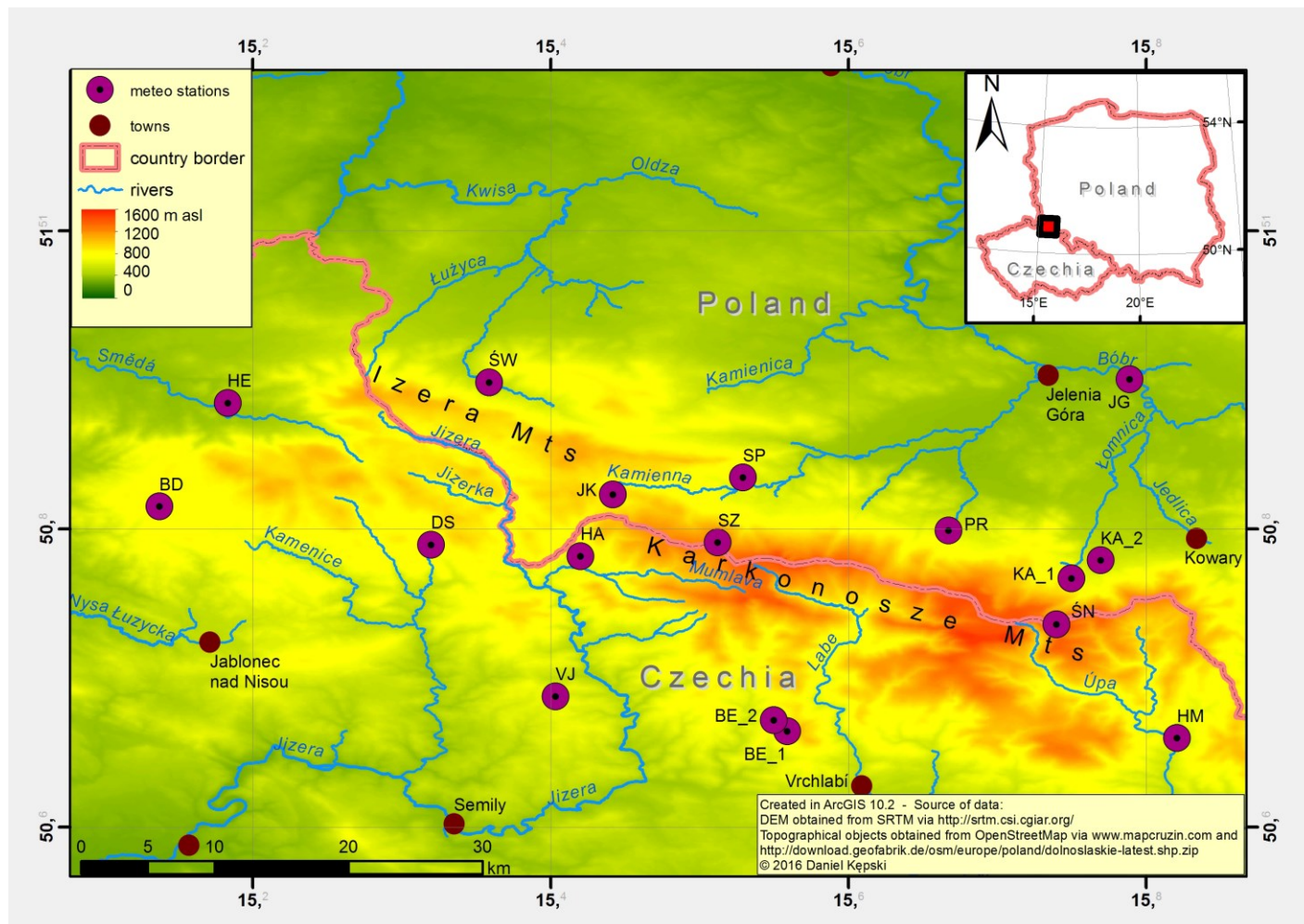


Fig. 1. Study area and location of meteorological stations.

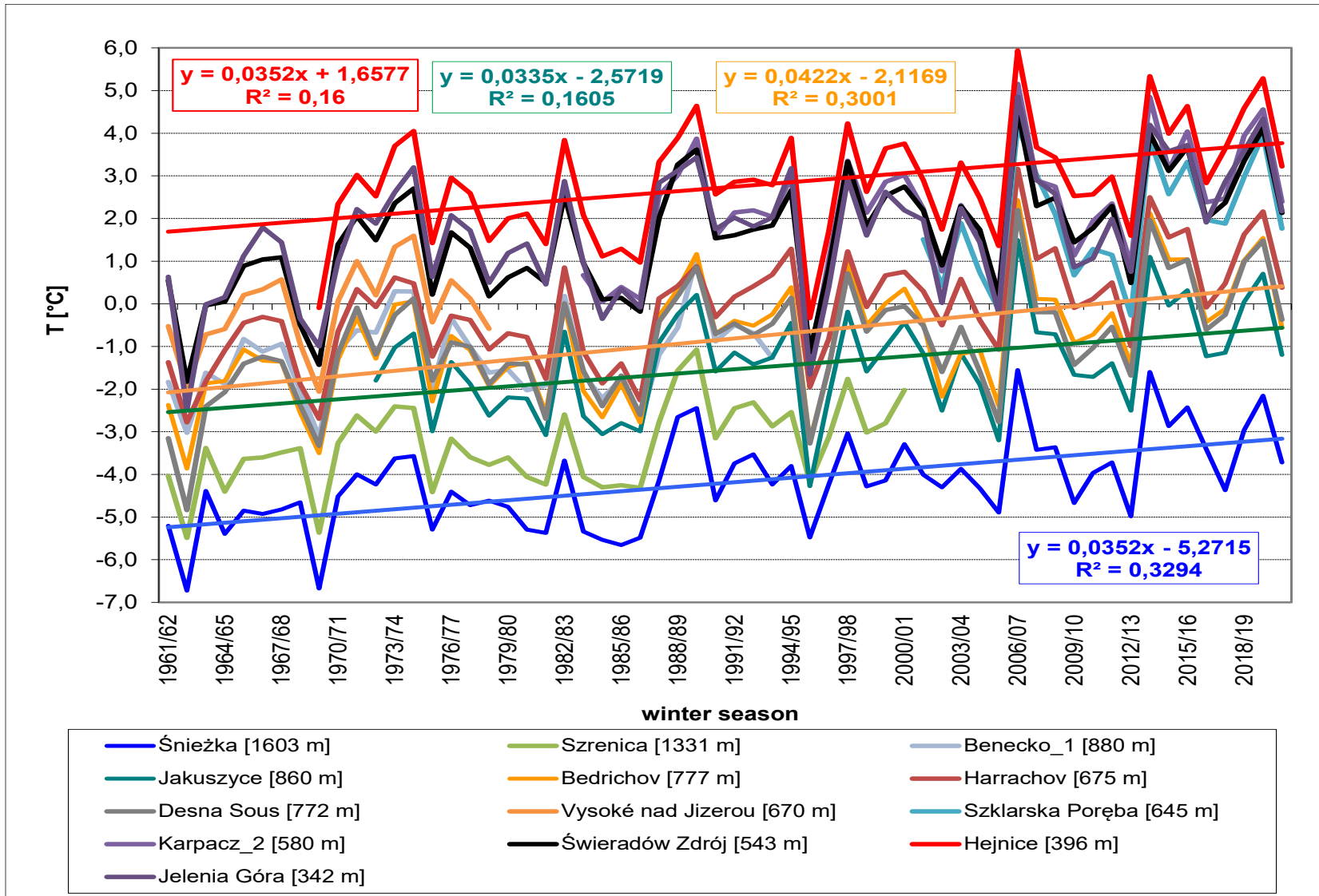


Fig. 2. The course of the seasonal mean (XI-IV) air temperature (T), 1961/62-2020/21.

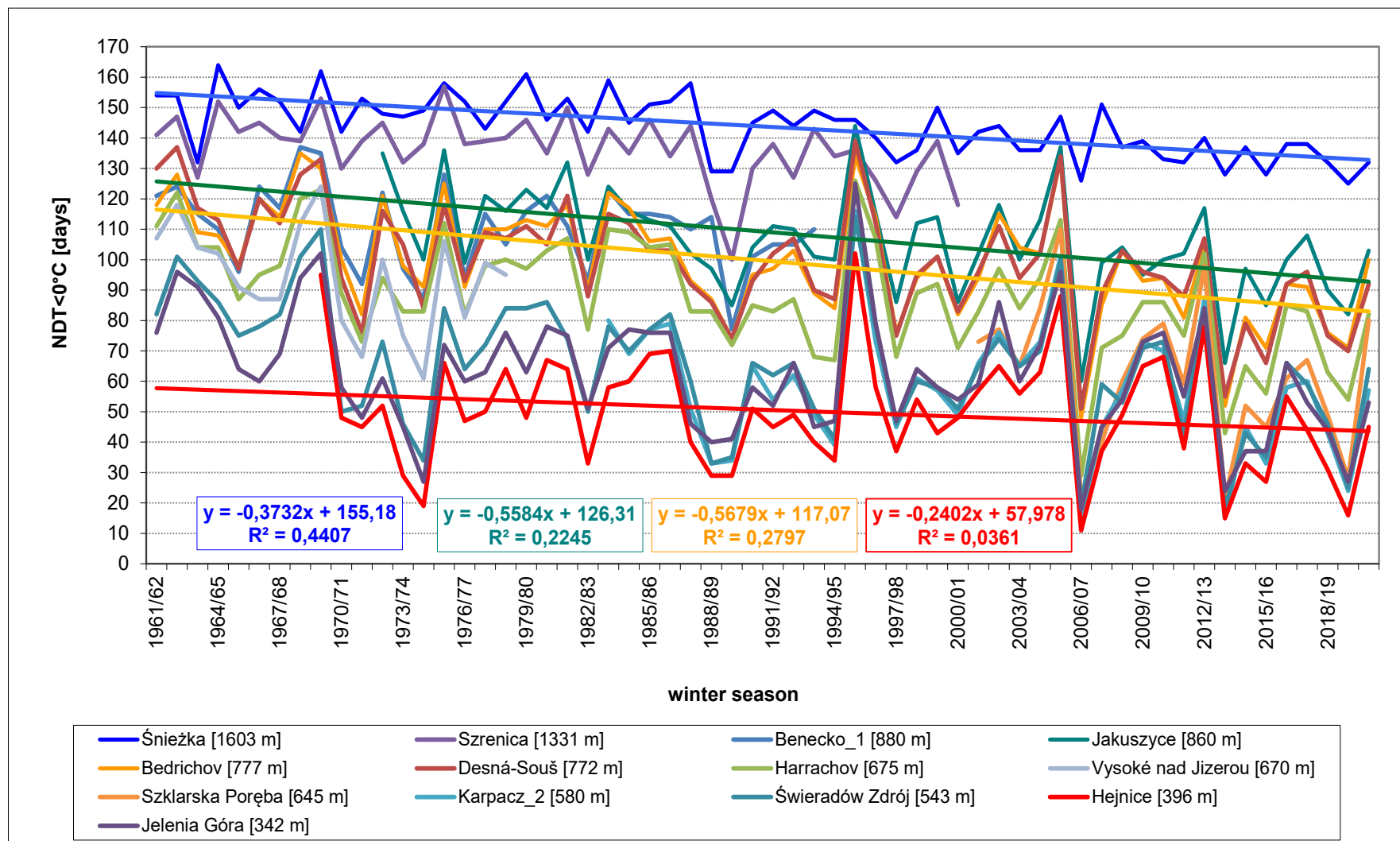
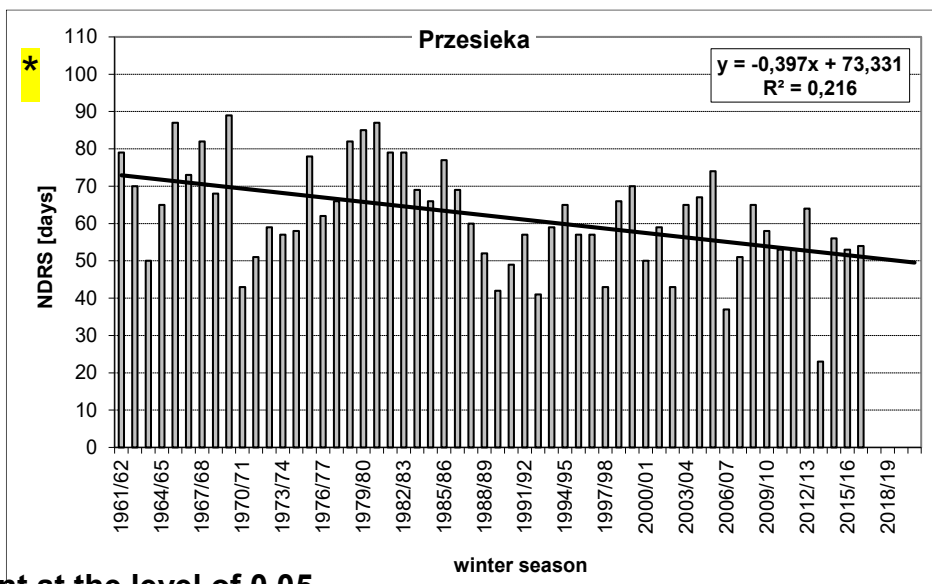
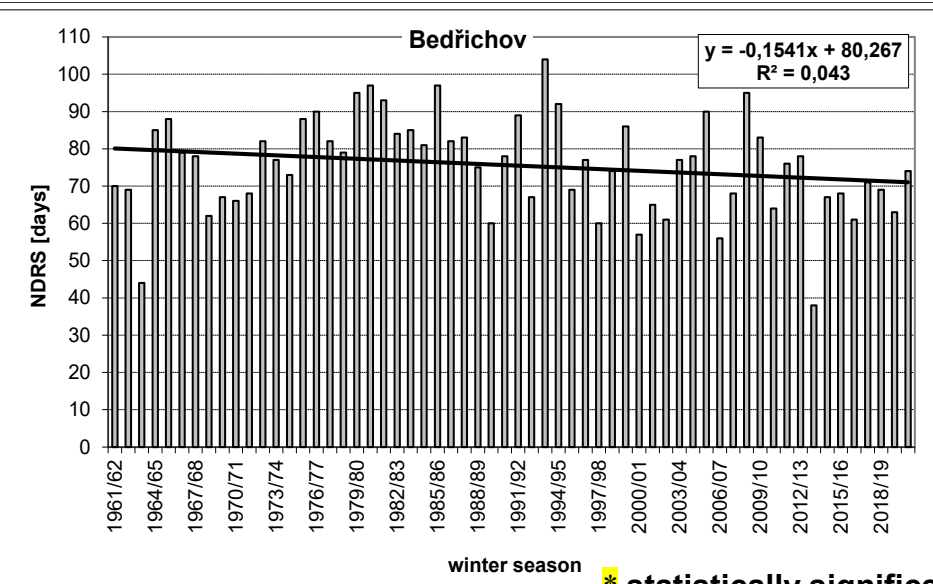
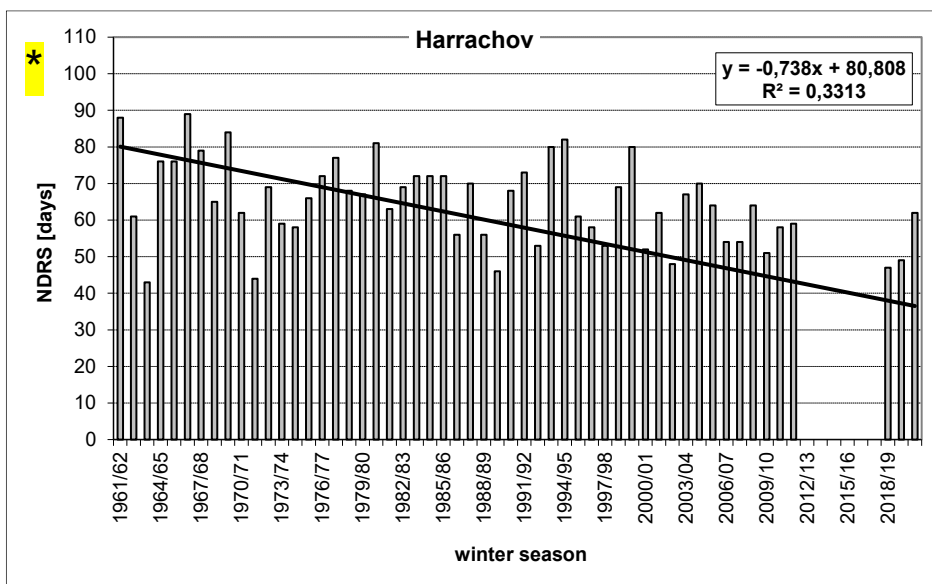
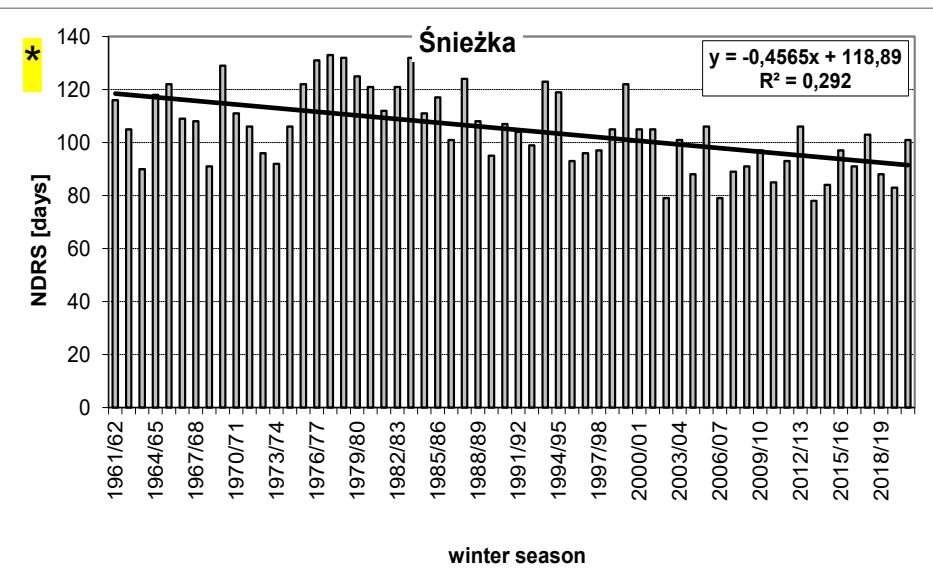


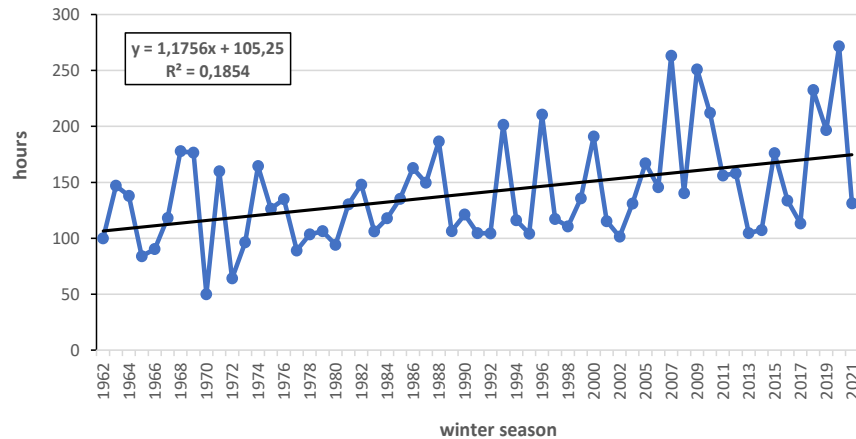
Fig. 3. The seasonal (XI-IV) number of days with the mean daily air temperature (NDT) < 0°C.



* statistically significant at the level of 0.05

Fig. 4. The seasonal number of days with solid precipitation (NDRS).

Śnieżka, April



Śnieżka, Nov-Apr

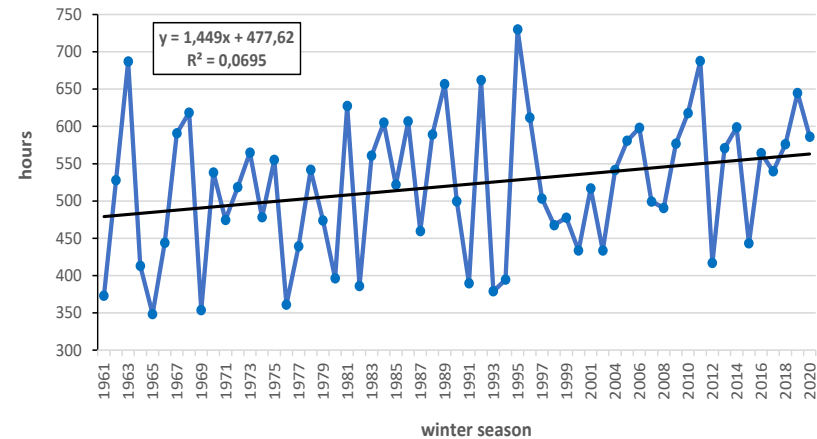


Fig. 5. Sunshine duration with the Campbell-Stokes heliograf at Mt. Śnieżka, 1961/62-2020/21.

Table 2. Pearson's correlation coefficient "r" and the direction and value of the trend "a" [hours / 10 seasons] for the seasonal (XI-IV) total sunshine duration (HSD / ASD).

station	number of seasons	November		December		January		February		March		April		Nov-Apr	
		r	a	r	a	r	a	r	a	r	a	r	a		
Śnieżka (HSD)	59	0,2	2,8	0,1	-2,1	0,0	-0,5	0,0	0,3	0,1	2,2	0,4	11,8***	0,3	14,5*
Desná-Souš (HSD/ASD)	45	0,1	1,8	0,1	-1,5	0,1	-2,2	0,2	-3,8	0,1	4	0,2	8,2	0,1	6,5
Hejnice (HSD/ASD)	52	0,2	3,4	0,2	2,3	0,2	-1,9	0,1	1,2	0,2	3,5	0,4	13,3**	0,4	21,7**
Jelenia Góra (HSD/ASD)	54	0,4	6,9**	0,5	6,9***	0,2	3,6	0,3	4,8	0,4	9,5***	0,6	18,8***	0,7	50,4***

* / ** / *** - statistically significant at the level of 0.05 / 0.01 / 0.001.

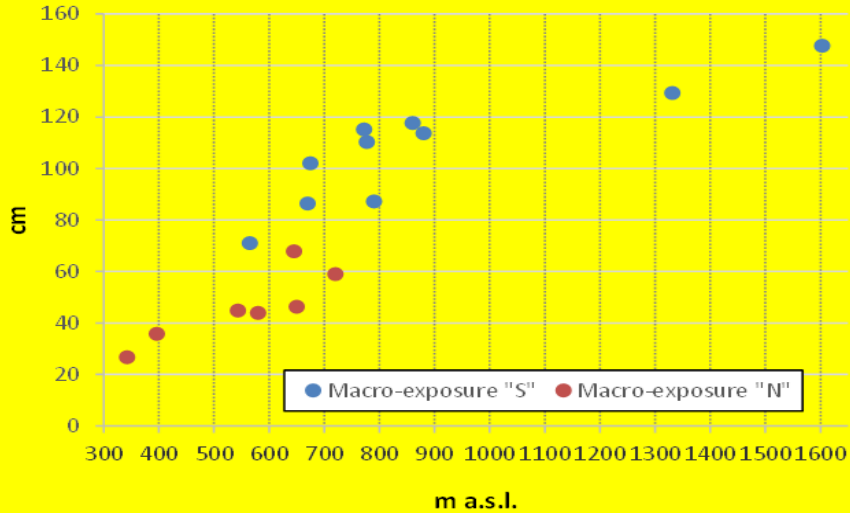


Fig. 6. The maximum depth of snow cover.

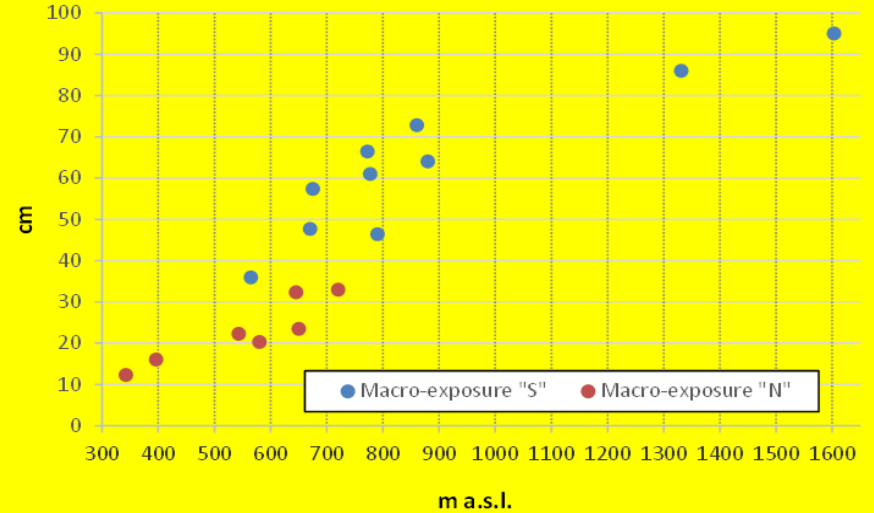


Fig. 7. The mean maximum depth of snow cover.

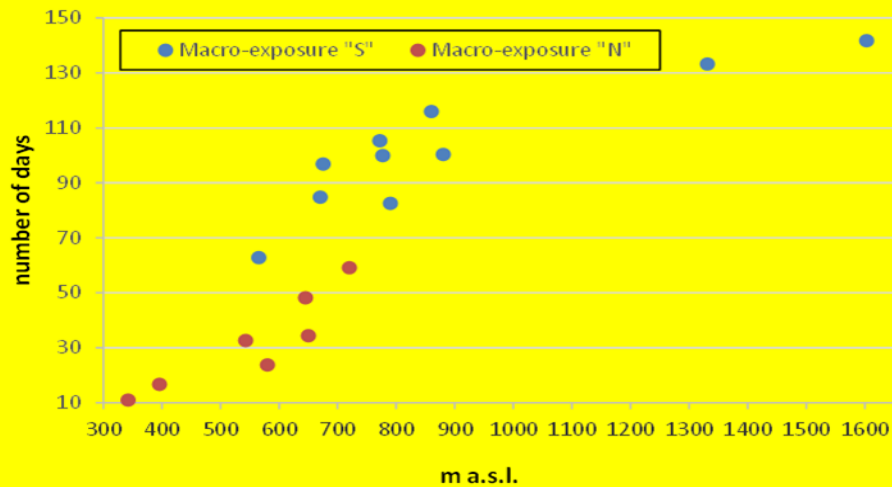


Fig. 8. The mean number of days with snow cover ≥ 20 cm.

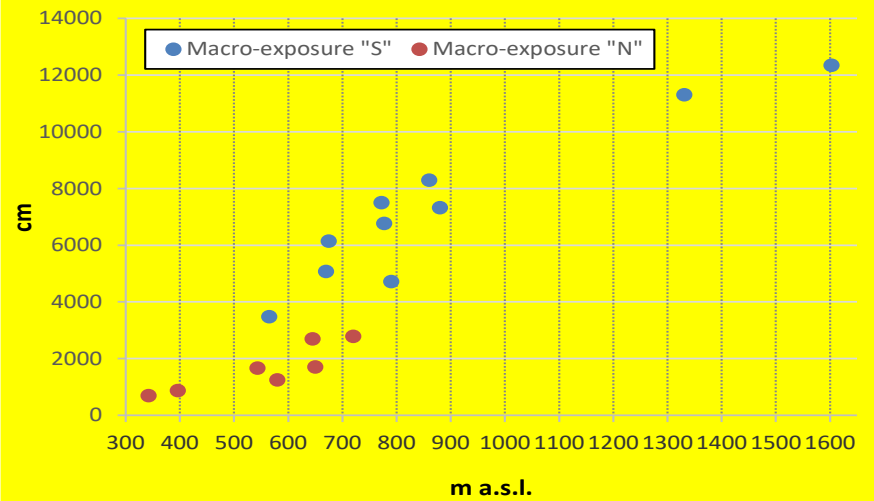


Fig. 9. The mean sum of depth snow cover.

Table 3. Trend [% / 10 seasons] of circulation types according to Hess and Brezowski, 1961-2020.

Typ	Nr	Nov-Apr	April
Wa	1	0,3	0,2
Wz	2	-0,8	-0,9
Ws	3	-0,3	0,3
Ww	4	0,1	-0,3
SWa	5	0,3	0,2
SWz	6	0,3	-0,8
NWa	7	0,7**	0,9*
NWz	8	0,2	-0,9
HM	9	-0,1	0,6
BM	10	0,8*	0,5
TM	11	-0,4*	-1,4*
Na	12	0,0	0,0
Nz	13	-0,4	-0,7
HNa	14	-0,2	0,8
HNz	15	-0,2	0,6
HB	16	-0,2	-0,5
TRM	17	1,0**	0,7
NEa	18	0,0	-0,3
NEz	19	-0,1	-0,1
HFa	20	0,0	0,0
HFz	21	-0,2	0,2
HNFa	22	-0,1	0,6
HNFz	23	-0,5*	-1,0
SEa	24	-0,2	0,0
SEz	25	-0,3	0,6
Sa	26	-0,1	-0,1
Sz	27	-0,1	0,2
TB	28	0,0	0,5
TRW	29	0,4	0,5
X	30	-0,1	-0,1

* - statistically significant at the level of 0,05.

** - statistically significant at the level of 0,01.

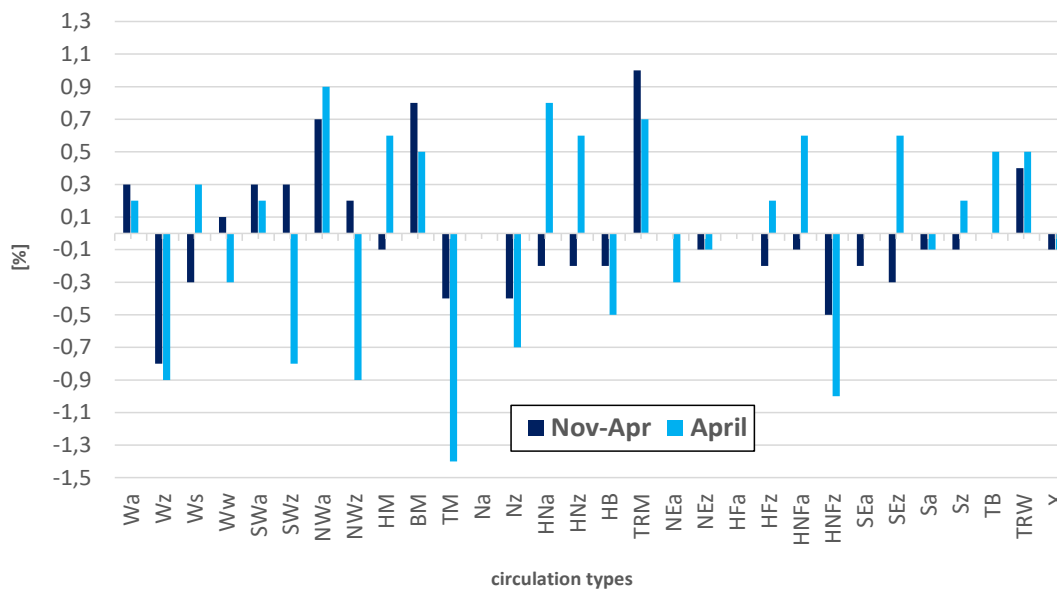
NWa – północno-zachodnia, antycyklonalna;

BM – klin (wał wyżowy) nad Europą Środkową;

TM – niż nad Europą Środkową;

TRM – bruzda nad Europą Środkową;

HNFz – wyż nad Morzem Północnym-Fenoscandią, cyklonalna.



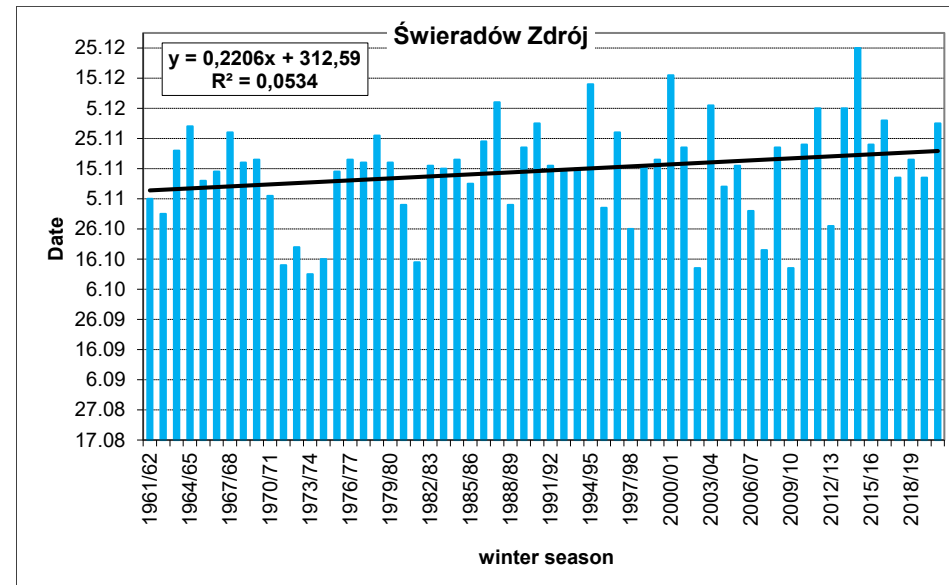
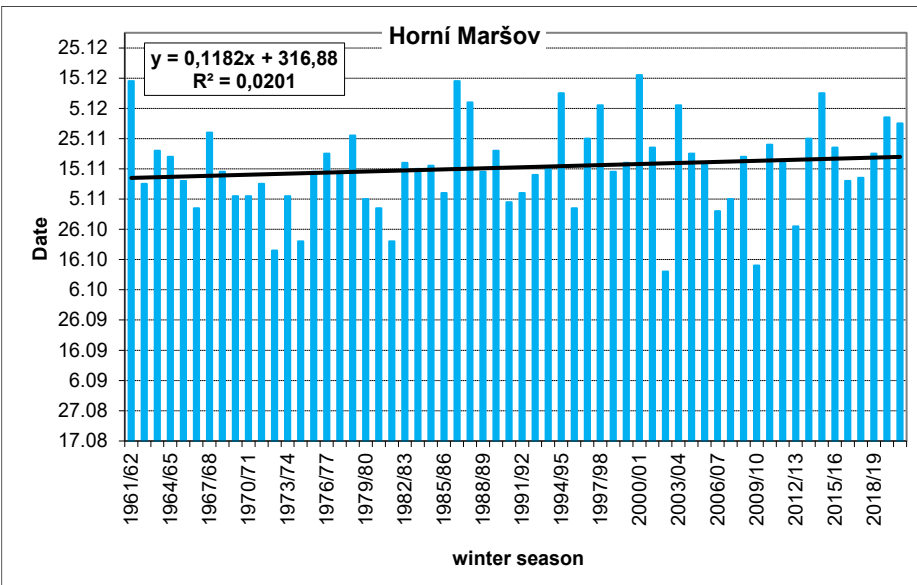
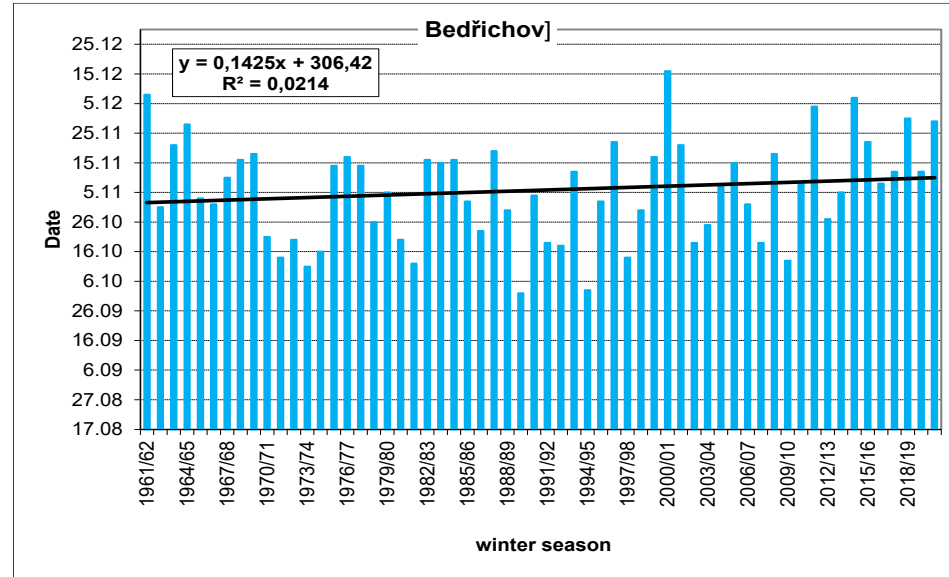
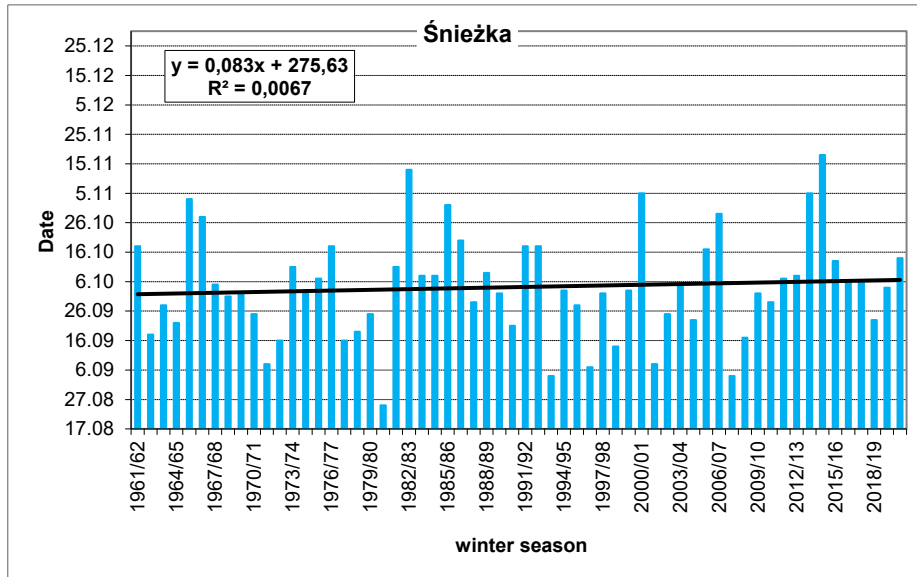
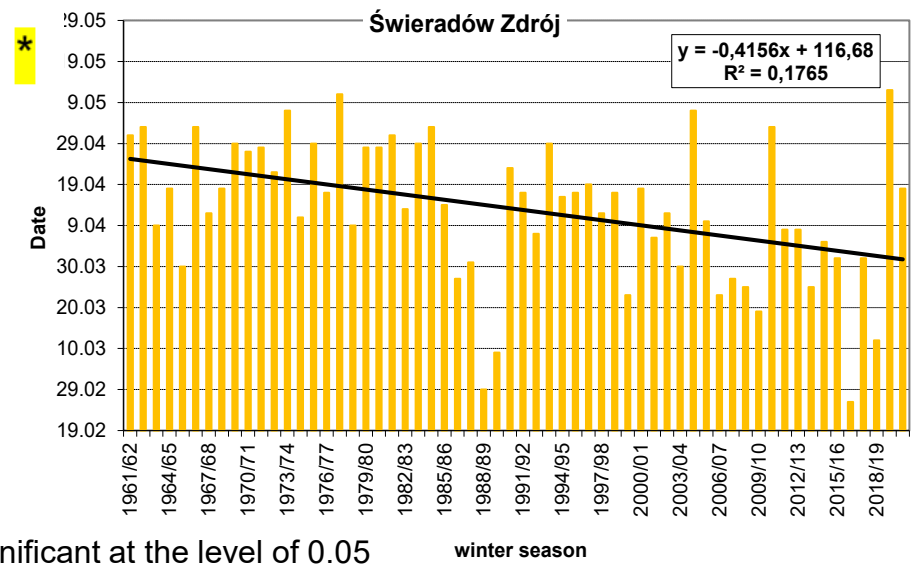
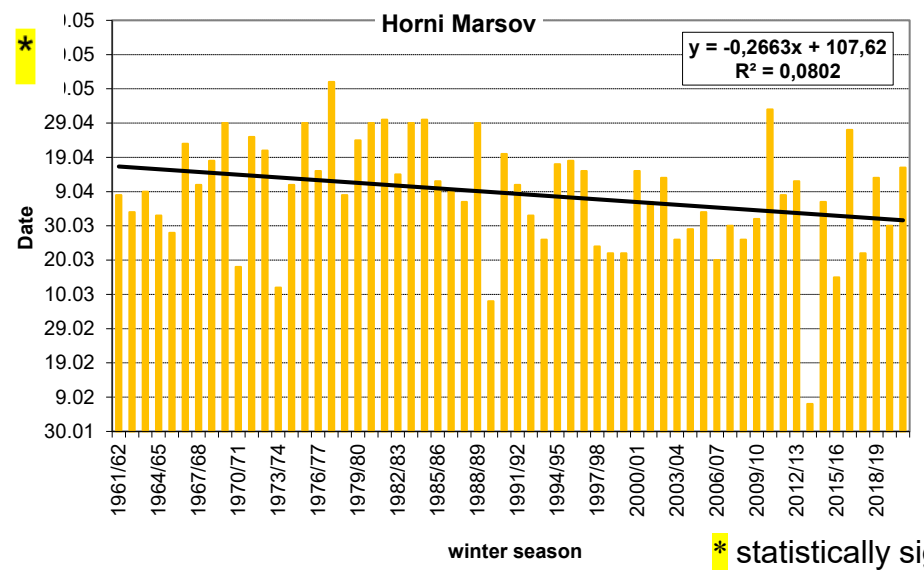
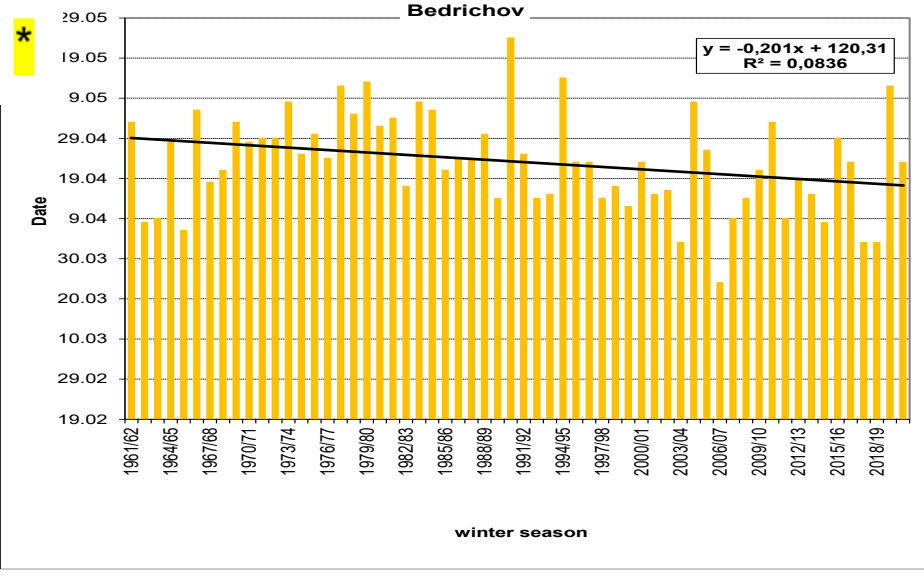
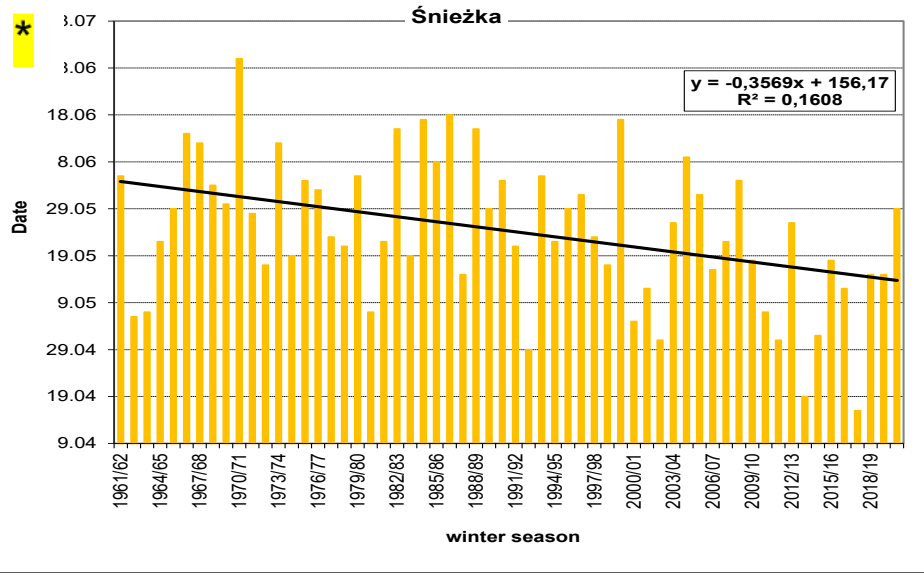


Fig. 10. The mean date of the start of snow cover.



* statistically significant at the level of 0.05

Fig. 11. The mean date of the end of snow cover.

Table 4. The mean dates of the start and of the end of snow cover in successive climatological norms.

macro-exposure	station	H (m a.s.l.)	number of seasons	StartSC				EndSC			
				1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
N-S (uncovered peak)	Śnieżka	1603	60	5.X.	3.X.	5.X.	5.X.	1.VI.	29.V.	27.V.	19.V.
S	Jakuszyce	860	56	1.XI.	31.X.	1.XI.	31.X.	1.V.	30.IV.	27.IV.	26.IV.
S	Bedřichov	777	60	4.XI.	1.XI.	3.XI.	9.XI.	29.IV.	29.IV.	23.IV.	19.IV.
S	Desná–Souš	772	60	6.XI.	4.XI.	2.XI.	6.XI.	27.IV.	25.IV.	22.IV.	20.IV.
S	Harrachov	675	54	10.XI.	6.XI.	4.XI.	4.XI.	21.IV.	21.IV.	20.IV.	16.IV.
S	Horní Maršov	565	60	14.XI.	16.XI.	17.XI.	18.XI.	15.IV.	14.IV.	9.IV.	4.IV.
N	Przesieka	650	56	13.XI.	13.XI.	14.XI.	15.XI.	21.IV.	17.IV.	12.IV.	10.IV.
N	Świeradów Zdrój	543	60	12.XI.	14.XI.	15.XI.	18.XI.	19.IV.	17.IV.	11.IV.	9.IV.
N	Hejnice	396	60	14.XI.	13.XI.	14.XI.	17.XI.	11.IV.	9.IV.	6.IV.	6.IV.
N	Jelenia Góra	342	60	15.XI.	16.XI.	18.XI.	21.XI.	13.IV.	10.IV.	5.IV.	3.IV.

Table 5. The mean potential (PT) and real (RT) time of snow cover duration in successive climatological norms.

macro-exposure	station	H (m a.s.l.)	number of seasons	PT [days]				RT [days]			
				1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020	1961-1990	1971-2000	1981-2010	1991-2020
N-S (uncovered peak)	Śnieżka	1603	60	240	239	235	227	167	170	169	167
S	Jakuszyce*	860	56	182	182	178	178	148	146	143	139
S	Bedřichov	777	60	177	180	172	162	141	141	136	129
S	Desná–Souš	772	60	173	173	172	166	138	137	136	133
S	Harrachov**	675	54	163	167	168	164	129	127	126	123
S	Horní Maršov	565	60	153	150	144	138	112	108	103	97
N	Przesieka***	650	56	160	156	150	147	93	87	87	84
N	Świeradów Zdrój	543	60	159	155	148	143	97	93	88	80
N	Hejnice	396	60	149	148	144	141	69	65	68	62
N	Jelenia Góra	342	60	150	146	139	134	65	60	64	59

* - no data 1961-1965; ** - no data 2012-2017; *** - no data 2017-2020.



Fig. 12. The mean potential (PT) and real (RT) time of snow cover duration in successive climatological norms.



Table 6. The Pearson's correlation coefficient "r" and the direction and value of the trend for the seasonal mean (XI-IV) of the start (StartSC) and of the end (EndSC) dates of snow cover.

macro-exposure	station	H (m a.s.l.)	number of seasons	StartSC		EndSC	
				r	trend [days / 10 seasons]	r	trend [days / 10 seasons]
N-S (uncovered peak)	Śnieżka	1603	60	0,1	0,8	0,4	-3,6**
S	Jakuszyce	860	56	0,2	1,6	0,2	-1,2
S	Bedřichov	777	60	0,1	1,4	0,3	-2,0*
S	Desná–Souš	772	60	0,1	0,9	0,2	-1,6
S	Harrachov	675	54	0,1	-1,0	0,2	-1,3
S	Horní Maršov	565	60	0,1	1,2	0,3	-2,7*
N	Przesieka	650	56	0,1	0,7	0,3	-2,5*
N	Świeradów Zdrój	543	60	0,2	2,2	0,4	-4,2***
N	Hejnice	396	60	0,1	0,9	0,2	-1,9
N	Jelenia Góra	342	60	0,2	2,1	0,3	-3,1*

* / ** / *** - statistically significant at the level of 0.05 / 0.01 / 0.001.

- StartSC - brak wyraźnych tendencji w kierunku i tempie zmian.
- EndSC – tendencje ujemne, w większości przypadków istotne statystycznie.
- Tempo zmiany EndSC – ok. 2-krotnie większe niż StartSC.

TEMPERATURA POWIETRZA / AIR TEMPERATURE (XI-IV) :

1. Średnie sezonowe wartości parametrów temperatury powietrza wykazują tendencje wzrostowe, istotne statystycznie zwykle na poziomie 0,01-0,001.

OPADY ATMOSFERYCZNE / PRECIPITATION (XI-IV):

1. Zmiany w opadach atmosferycznych:
 - a) brak wyraźnych tendencji w kierunku i tempie zmian w sezonowej NDR,
 - b) dla R – tendencja zwykle ujemna, w większości przypadków nie istotna statystycznie,
 - c) maleje liczba dni z opadem w fazie stałej (ok. 4-7 dni / 10 sezonów), tendencja jest istotna statystycznie dla 0,05.



USŁONECZNIENIE / SUNSHINE DURATION (XI-IV) :

1. Wykazuje tendencję wzrostową od ok. 15-50 godz. / 10 sezonów, odpowiednio w strefie szczytowej i u podnóża gór;
2. Największa wzrostowa tendencja występuje w kwietniu (IV) od ok. 12-19 godz. / 10 miesięcy, odpowiednio w strefie szczytowej i u podnóża gór;
3. Tempo wzrostu usłonecznienia jest odwrotnie proporcjonalne do wysokości n.p.m.;
4. Tendencje są istotne statystycznie zwykle na poziomie 0,01-0,001.

POKRYWA ŚNIEŻNA / SNOW COVER (XI-IV):

1. Stwierdzono następujące prawidłowości w analizowanych parametrach: MSDSC, SDSC, MSC, MMSC, NDSC, NDSC20:
 - a) ich wartości rosną wraz z wysokością n.p.m.; wzrost ten jest większy na stokach o makro-ekspozycji „N” niż „S”;
 - b) są wyższe na analogicznych wysokościach [m n.p.m.] na stokach o makro-ekspozycji „S” (dowietrznych zimą) niż na stokach o makro-ekspozycji „N” (zawietrznych zimą);
 - c) największe różnice w średnich wartościach parametrów, pomiędzy makro-ekspozycją „N” a „S”, występują w strefie wysokości 600-800 m n.p.m.

CYRKULACJA ATMOSFERYCZNA / ATMOSPHERIC CIRCULATION (XI-IV) :

1. Stwierdzono istotną statystycznie tendencję wzrostową częstości typów cyrkulacji antycyklonalnych **NWa, BM** o ok. +1% / 10 sezonów, przy jednoczesnym spadku sytuacji z niżem nad Europą Środkową (**TM**);
2. Największa wzrostowa tendencja (ok. +1,0% / 10 miesięcy) spośród wszystkich 30 typów cyrkulacji obserwowana jest **dla typu NWa** przy jednocześnie największej spadkowej tendencji (ok. -1,5% / 10 miesięcy) sytuacji z niżem (**TM**) i występuje w kwietniu (**IV**) – tj. miesiąc roztopów i zaniku pokrywy śnieżnej.



Powyższe elementy meteorologiczne i czynniki wpływają na:

FENOLOGIĘ POKRYWY ŚNIEŻNEJ / SNOW COVER PHENOLOGY (XI-IV):

- a) Najwcześniej pojawia się w najwyższych partiach gór (początek X) i postępuje w dół stoków (połowa XI);
- b) Najwcześniej zanika w dolnych partiach stoków (początek IV) i postępuje w górę stoków i ku szczytom gór (koniec V);
- c) Przeciętnie potencjalny czas zalegania (PT) wynosi od 140-150 dni w dolnej części profilu do ponad 220-230 dni w strefie szczytowo-wierzchowinowej;
- d) Rzeczywisty czas zalegania (RT) jest jednak dużo krótszy niż potencjalny.
- e) W kolejnych 30-leciach (normach klimatologicznych) obserwuje się sukcesywne skracanie PT i RT czasu zalegania pokrywy śnieżnej;
- f) Średni PT zalegania w obowiązującej normie 1991-2020, względem normy 1961-1990, uległ skróceniu od 7 do 16 dni;
- g) StartSC - brak wyraźnych tendencji w kierunku i tempie zmian;
- h) EndSC – tendencje ujemne, w większości przypadków są istotne statystycznie;
- i) Tempo zmiany EndSC – ok. 2-krotnie większe niż StartSC;
- j) Brak różnic w tempie zaniku pokrywy śnieżnej pomiędzy makro-ekspozycją „N” a „S”.



Reasumując, przyczynami skrócenia czasu zalegania pokrywy śnieżnej w Sudetach Zachodnich są:

1. Wieloletni wzrost wartości parametrów temperatury powietrza (cieple i tym samym wilgotne powietrze sprzyja szybszej ablacji pokrywy śnieżnej),
2. Wieloletni wzrost sum usłonecznienia - przyspiesza wiosenną ablację zleżającą, cieńszej i zanieczyszczonej pokrywy śnieżnej,
3. Zmiany w strukturze opadów – zmniejszenie udziału fazy stałej w cieplejszym klimacie, przy braku istotnych zmian w sumach opadów, wpływa na grubość pokrywy i wcześniejsze wiosenne jej topnienie,
4. Zmiany w cyrkulacji atmosferycznej – w tym wzrost częstości antycyklonalnych typów cyrkulacji z pogodą o dużym usłonecznieniu, szczególnie w kwietniu (miesiącu zaniku pokrywy śnieżnej w większości profilu wysokościowego Sudetów), przy jednoczesnym zmniejszeniu udziału cyklonalnych typów pogody.

Wszystko powyższe synergicznie wpływa na mniejszą grubość pokrywy śnieżnej, mniejszą liczbę dni z opadem stałym i sprzyja jej szybszemu wiosennemu zanikowi.

Uzyskane wyniki dotyczące przyczyn skrócenia czasu zalegania pokrywy śnieżnej w Sudetach Zachodnich korespondują z wynikami wcześniejszych badań z Europy i świata cytowanych w niniejszej prezentacji. Potwierdzają sukcesywne ocieplanie się klimatu, szczególnie widoczne w ostatnich kilku dekadach.

Badacze pytają, co będzie dalej???)



The One God only knows!)

Dziękuję za uwagę /Děkuji za pozornost / Thank you for your attention:

Grzegorz Urban

grzegorz.urban@imgw.pl
71 32 00 238

