LIBOR DUCHÁČEK

VERTIKÁLNÍ VARIABILITA POLOHY NULOVÉ IZOCHIONY V RÁMCI GEOMORFOLOGICKÝCH OBLASTÍ ČESKA

DUCHÁČEK, L. (2014): Vertical variability in the position of the zero isochion in geomorphologic regions of Czechia. *Geografie*, 119, No. 2, pp. 145–160. – Knowledge of the volume of water retained in mountainous areas serves as an important source of information for the anticipation of spring floods, as well as for other purposes, such as those related to agricultural management. Similarly, the extent and distribution of snow coverage (snow cover area – SCA) in lowlands are factors influencing the threat of large-scale floods caused by the melting of even a thin layer of snow cover. Every week during the winter months, the Czech Hydrometeorological Institute (CHMI) provides up to date information on the snow water equivalent present in Czech regions and especially within important hydrological basins. This information comes predominantly from an observation of net and field measurements. The position of the zero isohione, determined through remote sensing, helps to increase the accuracy of the calculations of such spatial distribution in Czechia. As a consequence of this practical use, changes in the accumulation and distribution of snow cover can be readily observed via remote sensing. This is further made easier by Czechia's orographic disposition, specifically its interconnected system of border mountains and a central highland. As a result, the position of the zero isohione can be determined with an accuracy of 50 m a.s.l. If we compare selected geomorphological regions, we can find statistically substantiated differences in the position of the zero isohione of more than 200 m.
KEY WORDS: zero isochion – snow line – snow water equivalent – snow water volume evaluation – geomorphologic regions.

Článek byl zpracován v rámci grantového projektu GAČR P209/12/0997 „Headwaters retention potential assessment with respect to hydrological extremes“.

Úvod

Prostorové rozložení sněhové pokrývky na území Česka a výpočet vodních zásob nabývá v poslední době značného významu. Rozvoj technologií a dostupnost snímků z dálkového průzkumu země (DPZ) umožňuje přesněji klasifikovat oblasti se sněhem a bez sněhu. Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) využívá těchto metod ke zpřesnění výpočtů zásob vody ve sněhu, které jsou zásadní pro účely prognózní služby v době tání, ale i pro správce vodních děl při manipulacích s retenčním prostorem nádrží. Pravidelnost snímkování navíc umožňuje zpřesnění předpovědí zásob vody v kratším než současném týdenním kroku. Vedle samotné distribuce vodní hodnoty sněhu, která je pravidelně měřena v rámci staniční sítě ČHMÚ i terénním měřením, lze z prováděné analýzy extrahovat i samotnou nulovou izochionu, která vymezuje oblasti se sněhovou

pokrývkou od nezasněžených oblastí. Při porovnání těchto linií vycházejících z delší řady pozorování, lze vysledovat určité tendence a rozdíly v nadmořské výšce nulové izochiony.

Výzkum rozložení sněhové pokrývky v rámci celého území Česka nebyl doposud v tomto měřítku blíže charakterizován, a přestože jsou známy obecné závislosti na množství sněhu mezi jednotlivými pohořími Česka, nebyly tyto vztahy prozatím kvantifikovány. ČHMÚ je vzhledem ke své bohaté datové základně jednou z mála institucí, která může výzkum vycházející ze snímků DPZ podložit pozemním měřením na svých stanicích. Hlavním cílem výzkumu je tak stanovení obecných závislostí ve vertikální poloze nulové izochiony mezi jednotlivými geomorfologickými oblastmi a pokusit se stanovit průměrné odchylky od polohy nulové izochiony v Krkonošské oblasti vůči zbylým regionům v Česku. Na základě dosažených výsledků lze následně najít vhodné uplatnění těchto tendencí v hydrologické službě i pro vodohospodářské účely.

Jak uvádí meteorologický slovník, izochiona je izolinie používaná ke znázorňování plošného rozložení jevů souvisejících se sněhem (Sobíšek, ed. 1993). Z mnoha významů pojmu je izochiona pro účely výpočtu zásob vody ve sněhu pravděpodobně nepřesnější pojem: čára spojující místa se stejnou výškou sněhové pokrývky, přestože pro účely projektu je významnější vodní hodnota sněhu než jeho výška. Jak dále uvádí slovník, lze tuto linii také označit pojmem *izonifa*. V anglo-saské literatuře je však běžnější obecnější pojem „*snow-line*“, který také vyjadřuje hranici mezi přírůstkem a úbytkem ledovce, přesněji „*equilibrium line*“. Nejčastěji autoři v podobně zaměřených projektech pracují s pojmem „*snow cover area*“ (SCA; Durand, Molotch, Margulis 2008), „*snow cover extent*“ (SCE; Andreadis, Lettenmaier 2006), jež odpovídá celkové ploše se sněhem nad určitým územím, ovšem cíl této práce je zaměřen pouze na hranici sněhu.

V tomto článku je nulovou izochionou označena linie, nad kterou se v měřítku Česka nalézá v daný okamžik sníh a výška sněhu se v průměru blíží nule. Autor se tak snaží definovat závislosti v průměrné poloze hranice sněhu mezi jednotlivými částmi Česka, které by pomohly přesněji vypočítat zásoby vody ve sněhu. Sledování těchto trendů se uplatní nejen v praxi pro vymezení sněhové pokrývky, ale lze je i zpětně aplikovat do oborů fyzické geografie ve spojitosti s horní hranicí lesa nebo klimatologickými faktory. Určité závislosti, ale spíše lokálního měřítka, nastínil již Jeník (1961) sledováním anemo-orografických systémů Východních Sudet. Stejně tak existuje řada prací zabývajících se rozložením sněhové pokrývky v rámci zájmových povodí na Šumavě (Kocum, Jelínek, Jeníček 2009), Krušných horách (Kutlákova, Jeníček 2012) nebo v Krkonoších (Ducháček 2009). Komplexní zhodnocení sněhové pokrývky na území Česka si však bere za své jen ČHMÚ, a to v oddělení hydrologického výzkumu, které pravidelně měří výšku a vodní hodnotu sněhu v Krkonoších a Jizerských horách a následně vyhodnocuje vlastnosti sněhové pokrývky. V zahraniční literatuře nalezneme nejčastěji charakterizování prostorového rozložení sněhové pokrývky pomocí DPZ nad rozlehlými plochami horských masivů (Hantel, Mauer 2011) nebo subarktických oblastí, kde je plošné rozmístění sněhu hodnoceno komplexně vzhledem k možným jarním povodním, dopravní infrastruktuře nebo pro účely těžby. Specifikace hranice sněhu je zaměřena spíše na ledovcové oblasti a jejich ústup.

Materiál a metody

Od roku 2010, kdy se vyhodnocování zásob vody ve sněhu věnuje oddělení hydrologického výzkumu, se postupně zefektivňuje metodika vyhodnocování a především se značně zkvalitnila data vstupující do finálního výpočtu. Jde především o kontrolu vstupních dat od pozorovatelů na základě porovnání hustoty sněhu s nejbližším okolím stanice, využití dat z automatických sněhoměrných stanic a také definování pomocných profilů, které na základě nárazového terénního měření doplňují síť operativních stanic (Bercha 2011). Datová základna ČHMÚ pro interpolaci SWE se skládá ze 430 pozemních stanic, 60 terénních profilových měření, 27 pomocných stanic a 11 automatických sněhoměrných stanic (obr. 1). Údaje o výšce a vodní hodnotě sněhu jsou v síti ČHMÚ vztahována každý týden k pondělí 7:00 SEČ (středoevropský čas). Verifikovaná vstupní data vstupují do výpočtu v prostředí ArcGIS, kde je na základě lineární závislosti s nadmořskou výškou provedena interpolace SWE na celém území Česka. Jak uvádí Šercl (2008), je použitá interpolační metoda váženým průměrem dvou metod IDW (*Inverse Distance Weighted Average Interpolation*) a interní metody ČHMÚ, kde váhou průměru je koeficient determinace lineární regrese. V místech, kde regresní model relativně dobře vystihuje rozložení interpolovaných hodnot v daném okolí, bude výsledný odhad interpolované veličiny více odpovídat hodnotě z lineárního regresního modelu. Naopak, čím je koeficient determinace nižší, tím větší váhu má odhad daný výsledkem metody IDW. Jako hranice území se sněhem a bez sněhu je stanovena hodnota 5 mm SWE, což odpovídá souvislé sněhové pokrývce.

Obdobnou metodu vycházející z datové základny pozemních měření a doplněnou o široké spektrum snímků DPZ používá ve svých modelech institut SFL (*Institute for Snow and Avalanche Research*) ve švýcarském Davosu, kde pro

Obr. 1 – Staniční síť využívaná k výpočtu zásob vody ve sněhu, prosinec 2013

potřeby meteorologické služby (MeteoSwiss) pravidelně vypočítávají zásoby sněhu. Bavera a kol. (2014) ve své práci našel velmi dobrou shodu mezi modelem založeným pouze na datech z pozemního měření a modelem doplněným o snímky poskytující informaci o SCA („snow cover area“), a to s rozdílem přibližně 8 % v celkovém objemu vody v povodí.

Výsledná interpolace je podrobena analýze nástrojem *Zonal Statistics* v prostředí ArcGIS, který provede na podkladě rastrové vrstvy SWE výpočet průměrné hodnoty SWE pro jednotlivá zájmová povodí ČHMÚ, vodní nádrže podniků Povodí a pro administrativní jednotky krajů Česka. Přepočtem na plochu území je získána hodnota objemu vody ve sněhu, která je následně přeposlána příslušným institucím. Interpolace i výpočet zásob vody sice vychází z široké databáze údajů o sněhové pokrývce, ale znalost nulové izochiony přispívá ke zpřesnění výsledků především pro menší povodí na pomezí geomorfologických jednotek a zároveň pomáhá identifikovat území s nejednoznačným pokrytím sněhem. Rozvoj družicového snímkování nabízí po sekundárním zpracování pestrou škálu informací a extrahování nulové izochiony je pouze jednou z mnoha možností jak údaje vyhodnocovat. Konkrétně lze ze satelitních snímků určit území pokryté sněhem, území bez sněhu a území, které v době přeletu zakrývala oblačnost. Z viditelného rozmezí území se sněhem a bez sněhu, lze extrahovat nulovou izochionu a určit její nadmořskou výšku. Porovnáním těchto nadmořských výšek mezi jednotlivými oblastmi Česka získáme statisticky podložený vztah v polohách nulových izochion, na jehož základě by mělo být možné určit pravděpodobnou nadmořskou výšku nulové izochiony v hledané oblasti, pokud je známa výška nulové izochiony v jiné. V prvních dvou letech projektu byly družicové snímky klasifikovány a dodávány společností GISAT s.r.o. a ČHMÚ zpočátku využíval tyto informace pouze velmi okrajově. Společnost GISAT s.r.o. zpracovávala družicové scény Terra a Aqua MODIS (*The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), které přináší informace o stavu sněhové pokrývky z celého území Česka, a to nejčastěji v dopoledních hodinách. Denní perioda snímání a 36 spektrálních kanálů pořizovaných s prostorovým rozlišením od 250 m po 1 km umožňují celou řadu aplikací, které blíže popisuje např. Hall a kol. (2002). Pro účely prezentovaného monitoringu je využíváno zejména pásma 1 a 2 s prostorovým rozlišením 250 m a několika kanálů s rozlišením 500 m, především pak pásma MWIR (střední infračervené pásmo) nezbytného k rozlišení sněhové pokrývky od oblačnosti. Metodu vyhodnocování snímků DPZ pro potřeby analýzy sněhu popisuje např. Spazierová, Brodský (2011). Předností těchto dat je aktuálnost a časová dostupnost. Každý den jsou k dispozici dva satelitní snímky pokrývající celé naše území několik hodin po jejich pořízení, což umožňuje zpracování v reálném čase. Výběr družicových snímků pro analýzu polohy sněhové linie je založen zejména na datu jejich pořízení a množství oblačnosti. Pro každý týden sledovaného období je volen jeden reprezentativní snímek. Vzhledem k pondělním pozemním měřením ČHMÚ jsou vybírány scény přímo pořízené v tento den nebo v nejbližším možném termínu. Pokud v průběhu monitorovaného týdne nedošlo k výraznému tání nebo naopak sněžení, je možné využít i scény z průběhu celého týdne popř. vytvořit jejich kompozity. Od ledna 2013 jsou snímky jednotlivých přeletů získávány pro ČHMÚ přímo z portálu NSIDC (*The National Snow and Ice Data Center*), čímž je budována databáze snímků pro každý den roce. To umožňuje

vyhodnocovat situaci sněhové pokrývky i mimo pondělní termín. Vlastnosti snímků se od předchozí distribuce přes GISAT nezměnila, navíc je součástí snímku i informace o kvalitě jednotlivých klasifikací.

Následné zpracování vybraných scén se skládá z několika kroků. Získaný komprimovaný snímek je nejprve nutno transformovat do formátu kompatibilního s ArcGIS, v tomto případě HDF-EOS (*Hierarchical Data Format – Earth Observing System*) do Multi-Band Geo TIFF (*Tag Image File Format*) v projekci UTM (*Universal Transverse Mercator*). Do prostředí ArcGIS je následně importován takto transformovaný snímek jako klasifikovaný rastr, ze kterého jsou pro účely nulové izochiony podstatné třídy 200 (sněhová pokrývka), 25 (území bez sněhové pokrývky) a 50 (oblačnost). Zgeneralizovaný rastr je převeden na polygonový *shapefile* a ten následně na liniový *shapefile*. Z liniového *shapefile* jsou pomocí několika kroků v nástroji „*selection*“ extrahovány pouze linie, které jsou hranicí mezi oblastmi se sněhovou a bez sněhové pokrývky, což odpovídá hledané nulové izochioně. Takto extrahovaná linie je pak tzv. maskou v nástroji „*Extract by Mask*“, která vybere na podkladovém digitálním elevačním modelu o rozlišení 25 m (*DEM 25*) všechny hodnoty pixelů ležící pod linií. Výsledkem je rastr skládající se z řady jednotlivých pixelů obsahující informaci o nadmořské výšce. Tato rastrová vrstva je v posledním kroku podrobena analýze nástroje „*Zonal Statistics*“, který vypočte průměrnou, maximální a minimální hodnotu pixelů, které spadají pod jednotlivé polygony geomorfologických oblastí (obr. 2).

Celkem bylo analyzováno 67 situací v přibližně týdenním kroku od října 2010 do prosince 2013. Z každého snímku byla extrahována nulová izochiona, a to i přesto, že byla často viditelná pouze malá část území. Jako maska oblastí sloužící ke vzájemnému porovnání byl určen polygonový *shapefile* 27 geomorfologických oblastí (Balatka, Kalvoda 2006), které jsou z hlediska akumulace

Obr. 2 – Geomorfologické subprovincie a oblasti Česka. Zdroj: Balatka 2006, upraveno.

Tab. 1 – O kolik metrů je nulová izochiona výše (+) nebo níže (–) oproti oblasti ve sloupci

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
1	0																										
2	73	0																									
3	-109	-152	0																								
4	-51	-122	56	0																							
5	-260	-60	-125	0																							
6	-241	-50	-140	-25	0																						
7	-411	-241	-260	-150	-189	0																					
8	-114	85	-1	97	132	303	0																				
9	-66	-230	-32	-91	-18	14	139	-112	0																		
10	-57	184	67	271	247	471	79	166	0																		
11	39	-56	143	59	191	248	377	76	176	-2	0																
12	-61	166	95	188	205	347	82	188	7	4	0																
13	-94	-292	-94	-157	-50	-35	114	-180	-50	-277	-245	-251	0														
14	-269	-64	-122	-15	11	144	-121	-10	-245	-210	-187	37	0														
15	-403	-166	-237	-101	-65	93	-197	-124	-326	-336	-293	-37	-66	0													
16	-303	-266	-68	-115	-12	-29	114	-147	3	-243	-204	-182	12	-7	45	0											
17	-113	83	47	153	222	314	26	153	-68	-56	207	169	266	159	0												
18	-10	-125	50	-23	105	118	267	-25	82	-106	-76	-117	145	118	204	93	-33	0									
19	-124	-269	-68	-129	-17	20	126	-120	-15	-204	-220	-191	42	-7	56	22	-164	-134	0								
20	-80	-273	-81	-106	-2	-25	132	-143	-13	-232	-232	-175	24	-3	52	-9	-192	-124	9	0							
21	-369	-149	-206	-103	-75	72	-210	-98	-359	-337	-302	-51	-96	-21	-59	-289	-221	-87	-83	0							
22	-266	-52	-140	-36	15	179	-156	-19	-248	-212	-210	39	-18	81	44	-202	-92	-21	3	89	0						
23	24	-84	108	39	164	182	326	58	154	-42	-31	-36	208	172	249	160	23	51	177	159	267	175	0				
24	-92	-134	90	-7	120	183	308	9	106	-87	-76	-81	184	139	227	159	-38	16	146	151	241	146	-34	0			
25	-72	-188	-22	-71	32	33	193	-108	30	-185	-179	-164	70	55	84	85	-123	-72	49	44	113	29	-88	-111	0		
26	-186	-271	-113	-186	-66	-41	132	-218	-48	-280	-255	-290	-3	-53	36	9	-219	-150	-41	-54	63	-47	-175	-189	-65	0	
27	-298	-270	-10	-112	25	47	206	-110	-4	-181	-182	-171	75	42	125	80	-143	-77	39	62	136	38	-128	-102	10	115	0

Geomorfologické oblasti Česka: 1 – Jihomoravské Karpaty, 2 – Jihomoravská pánev, 3 – Slovensko-moravské Karpaty, 4 – Sředomoravské Karpaty, 5 – Jihočeské pánve, 6 – Západní Beskydy, 7 – Šumavská hornatina, 8 – Západobeskydské podhůří, 9 – Brněnská vrchovina, 10 – Severní vňekarpatské sníženiny, 11 – Západní vňekarpatské sníženiny, 12 – Slezská nížina, 13 – Českomoravská vrchovina, 14 – Středočeská pahorkatina, 15 – Českokolecká oblast, 16 – Jesenická oblast, 17 – Krkonoško-jesenické podhůří, 18 – Východočeská tabule, 19 – Plzeňská pahorkatina, 20 – Brdská oblast, 21 – Karlovarská vrchovina, 22 – Orlická oblast, 23 – Středočeská tabule, 24 – Severočeská tabule, 25 – Podkrušňohorská oblast, 26 – Krušňohorská hornatina, 27 – Krkonošská oblast.

i tání sněhu nejvhodnější a nulová izochiona v jednotlivých oblastech je uvnitř daných územích nejvíce homogenní. Pokud tedy bylo možné ze satelitního snímku určit izochionu alespoň ve dvou geomorfologických oblastech, vzájemným porovnáním získáme výškový rozdíl např. mezi Jesenickou oblastí a Krušnohorskou hornatinou.

Za sledované období bylo možné celkem 810krát definovat průměrnou nadmořskou výšku nulové izochiony v geomorfologické oblasti. Nejčastěji byla určena nulová izochiona v horských oblastech, kde se sních vyskytuje nejdéle. Vzájemným porovnáním oblastí v rámci jedné situace, resp. dne, lze za ideálních podmínek dosáhnout 351 porovnání, což ovšem znamená, že v každé geomorfologické oblasti je definována průměrná výška nulové izochiony, což je k výškové členitosti oblastí nereálná hypotéza. Součet všech porovnání činí 6 181. Nejčastěji šlo porovnat výšku izochion Krkonošské, Jesenické a Šumavské oblasti. Nejméně pak se Slezskou nížinou a Jihomoravskými Karpaty, kde se za celou dobu snímkování objevil sních pouze šestkrát. Pro každý pár oblastí tak byla získána sada rozdílových hodnot, které byly zprůměrovány $\alpha_{0,1}$ useknutým průměrem (je odděleno 10 % nejvyšších a 10 % nejnižších hodnot), aby se alespoň u širších sad potlačily extrémní hodnoty. Výsledkem je tabulka hodnot (viz tab. 1), kde na základě nadmořské výšky v jedné geomorfologické oblasti, lze dopočítat pravděpodobnou výšku nulové izochiony v jiné. Jako referenční oblast je preferována Krkonošská oblast, kde se pravidelně provádí profilová měření a zároveň je to oblast, kde se sněhová pokrývka drží nejdéle z celé republiky a je zde i vysoká pravděpodobnost nejranějšího výskytu sněhové pokrývky.

Výsledky

Na základě sněhových linií stanovených dle DPZ bylo zjištěno, že variabilita nadmořské výšky nulové izochiony je v rámci celého Česka velmi vysoká. Toto tvrzení dokládá obrázek 3, vyjadřující maximální, minimální a průměrnou nadmořskou výšku polohy nulové izochiony v jednotlivých dnech během dvou sledovaných zim. Jak je z obrázku 3 patrné, rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou nadmořské výšky nulové izochiony v jeden den může dosahovat až stovek metrů. Pokud by se pro stanovení polohy sněhové linie použila pouze průměrná nadmořská výška, tedy jediná hodnota, došlo by v některých částech Česka k nadhodnocení a v jiných k podhodnocení rozsahu sněhové pokrývky.

Pro vzájemné porovnání jednotlivých geomorfologických oblastí se jeví jako nejvhodnější vztáhnout nadmořskou výšku nulové izochiony k jedné oblasti a vůči ní ostatní porovnávat. Jako ideální oblast lze považovat Krkonošskou oblast, která obsahuje jak nejvyšší polohy nad 1 000 m n. m., tak ploché nížiny ve Frýdlantském výběžku a hranici sněhu tak lze identifikovat během celého zimního období.

Na obrázku 4 je pomocí krabicového grafu (*box plot*) znázorněno rozložení zaznamenaných nadmořských výšek nulových izochion jednotlivých geomorfologických oblastí vůči poloze nulové izochiony v Krkonošské oblasti v 500 m n. m. Graf vyjadřuje rozsah sledovaných rozdílů každé oblasti vůči Krkonošské oblasti. Poloha nulové izochiony 500 m n. m. byla stanovena proto, že za této situace se dá předpokládat sněhová pokrývka na většině území Česka. Na

Obr. 3 – Minimální, maximální a průměrná nadmořská výška nulové izochiony z dat DPZ. Zdroj: Tučková 2012, upraveno.

pozadí grafu je znázorněn rozsah mezi maximální a minimální nadmořskou výškou v každé geomorfologické oblasti, který pomáhá zjistit, zda se sněhová pokrývka v dané oblasti již vyskytuje nebo leží-li nulová izochiony nad nejvýše položenými polohami oblasti. Zároveň jsou křížky zobrazeny případné extrémní hodnoty, které nebyly do mezikvartilového rozpětí zahrnuty. Černou tečkou je v grafu znázorněna průměrná hodnota nadmořské výšky nulové izochiony vycházející z $\alpha_{0,1}$ useknutého průměru a která ve většině případů odpovídá i Mediánu. Geomorfologické oblasti jsou seřazeny zleva doprava dle rostoucího rozmezí nadmořských výšek, což přibližně odpovídá pořadí od nejnižších poloh Česka po ty nejvyšší.

Z obrázku 4 lze vyčíst několik podstatných výsledků dosažených vzájemným porovnáním nulových izochion: Rozsah hodnot, tedy rozdíl v poloze od nulové izochiony v Krkonošské oblasti, roste s počtem extrahovaných nulových izochion. U horských oblastí tak dosahují hodnoty rozsah i nad 400 výškových metrů. Při zaměření na reprezentativnější vzorek prostředních 50 % hodnot, je tento rozsah již mnohem menší a u většiny oblastí nepřesahuje 100 výškových metrů. Pouze u Brdské oblasti a Slovensko-moravských Karpat je rozsah nápadně větší. U nejvyšších horských oblastí je v rámci těchto středních 50 % znát značná homogenita prvku, což značí míru přesnosti hledaného rozdílu, tedy že polohu nulové izochiony v Šumavské a Krušnohorské hornatině, v Orlické a Jesenické oblasti a v Západních Beskydech lze touto metodou určit přibližně s přesností 50 m n. m.. Obdobná homogenita, často i větší, je znát i u většiny nížinných oblastí, kde ovšem prvek není podložen tak velkým počtem pozorování.

Fakt, že průměr hodnot (tečka) v naprosté většině případů odpovídá mediánu prvku, značí, že při dostatečném počtu extrahovaných izochion je o extrémní hodnoty zbažený průměr vhodná vypovídající veličina. To ovšem platí pouze pro jednotlivé oblasti, protože průměrná poloha nulové izochiony, v tomto případě 503 m n. m., by byla v rámci celého Česka neobjektivní, jelikož pro nížinné oblasti by byla nadhodnocená a pro jižní část Česka relativně nadhodnocená.

Z grafu lze dobře vyčíst, v kterých oblastech se sníh za dané polohy nulové izochiony v Krkonošské oblasti nachází a o kolik by se poloha nulové izochiony

Obr. 4 – Krabicový graf zobrazující polohu nulové izochiony v geomorfologických oblastech vůči nulové izochioně v Krkonošské oblasti v nadmořské výšce 500 m n. m.

musela zvýšit, aby hranice sněhu ležela nad nejvyšším bodem sledované oblasti. Konkrétně, pokud by ležela nulová izochion v Krkonošské oblasti o 100 m výše, tedy v 600 m n. m., s vysokou pravděpodobností by pak sněhová pokrývka nebyla zaznamenána v prvních osmi oblastech (v pořadí osy *x*). Při situaci, kdy nulová izochion leží v Krkonošské oblasti v 800 m n. m., je dle výsledovaných hodnot pravděpodobné, že sníh se bude vyskytovat již jen v hornatějších oblastech počínaje Českoleskou oblastí.

Opačně lze dle stejného konsenzu určit polohu nulové izochiony v Krkonošské oblasti na základě nulové izochiony v jakékoli geomorfologické oblasti v Česku (blíže viz tab. 1). Takto lze porovnat a vztáhnout nulovou izochionu s každou z 27 oblastí, ovšem vzhledem k četnosti pozorování a především faktu, že se sněhová pokrývka v Česku vyskytuje většinou buď celoplošně, nebo jen v horských oblastech, je porovnání mezi jednotlivými pohraničními pohořími nejpraktičtější a zároveň nepřesnější.

Obecně lze konstatovat, že v rámci Česka se vyskytuje nulová izochion nejvýše v české části Šumavy a to přibližně o 200 m výše než v Krkonoších. V průměru o 100 m výše nalezneme v porovnání s Krkonošemi nulovou izochionu v Českém lese, Krušných horách a v Jeseníkách. Menší rozdíly pak vykazuje Českomoravská vrchovina, Jeseníky a Brdy, kde je izochion přibližně o 70 m výše. Rozdíl do 50 m vůči Krkonošské oblasti se vyskytuje ve zbylých pohořích Česka, tedy Západních Beskydech a v Orlických horách, kde je poloha nulové izochiony téměř srovnatelná.

Oblasti, kde je nulová izochion naopak níže než v Krkonošské oblasti, nalezneme v jihomoravských nížinách, kde se zpravidla vyskytne sníh, až když

Obr. 5 – Výškový rozdíl nulové izochiony geomorfologických oblastí od polohy nulové izochiony v Krkonošské oblasti

v horských oblastech leží alespoň v 500 m nad mořem. Výškový rozdíl přesahuje i -250 m, ale pro přesnější porovnání je však potřeba větší četnost srovnávacích situací v nižších polohách. Teoreticky lze dle výsledků pozorovat polohu nulové izochiony v rámci Česka v rozptýlu 504 m. Pro porovnání s alpskými zeměmi uvádí Parajka a kol. (2010) pozorované rozmezí hranice sněhu pro Rakousko až 960 m (min. 590 m n. m.; max. 1 550 m n. m.) při pokrytí přibližně 80 % území sněhem.

Částečné ověření umožňuje porovnání nulových izochion s liniemi vycházejícími z interpolace SWE pro potřeby ČHMÚ (viz část Materiál a metody). Linie je extrahována stejným způsobem jako nulová izochiona ze snímků DPZ, ovšem jako hranice území se sněhem a bez sněhu je stanovena hodnota 5 mm SWE. Takto byly vyhodnoceny všechny pondělní interpolace od 29. 11. 2010 do 30. 4. 2012, tedy celkem 38 výpočtů, do kterých nevstupovaly žádné údaje o limitní nadmořské výšce sněhové pokrývky. Z obrázku 5 lze vyzkoušet značnou homogenitu mezi výškovými rozdíly jednotlivých geomorfologických oblastí. Menší homogenitu vykazují oblasti, u kterých je menší řada pozorování, tedy nížinné oblasti na jižní Moravě (Jihomoravské Karpaty, Slovensko-moravské Karpaty). Z grafu je také dobře patrné, v kterých oblastech se nejčastěji nachází nulová izochiona v porovnání s Krkonošskou oblastí výše nebo níže. U většiny oblastí je rozdíl v poloze nulové izochiony extrahované z DPZ snímků a linie extrahované z interpolace SWE do 30 m. Tento rozdíl lze při prostorovém rozlišení DPZ i interpolace v ArcGIS považovat za zanedbatelný, čímž se pomocí dat z pozemního měření podařilo nezávisle potvrdit trend vysledovaný ze satelitních snímků.

Diskuze

Metoda definice nulové izochiony vychází z nejpresnějších dostupných dat a nástrojů v prostředí ArcGIS. Průměrná výška nulové izochiony se jeví vzhledem k prostorovému rozlišení DEM (25 m) jako poměrně přesná. Obdobně nulovou izochionu extrahuje ze snímků MODIS a DEM (30 m) i Harshburger a kol. (2010), který určuje její polohu jako střední hodnotu nadmořských výšek bodů vzniklých konverzí gridu sněhové pokrývky. Střední hodnota je tak vypočtena z množiny nadmořských výšek bodů spadajících do 600 m širokého bufferu kolem každého hraničního bodu. Tato metoda vychází z definice WMO (Seidel a kol. 1997; Kleindienst, Wunderle, Voigt 2000), která stanovuje hranici sněhu jako nadmořskou výšku pokrytou alespoň z 50 % sněhem. Pro analýzu nulové izochiony v Česku se použitá metoda extrakce pixelů z DEM 25 jeví jako dostatečně přesná a definování bufferu by vzhledem k vysokému rozlišení nepřineslo výraznější zpřesnění nadmořské výšky.

I přes použití poměrně přesné analýzy je výška nulové izochiony stále těžko definovatelná vzhledem k její vysoké variabilitě. Poloha nulové izochiony je obecně sice nejvíce závislá na nadmořské výšce, ale v rámci vyšších poloh pohoří hrají značnou roli i další fyzicko-geografické faktory jako je sklonitost, expozice svahu i členitost terénu v nejbližším okolí. Další nejistoty vznikají na území hustě pokrytém lesem, kde satelitní snímkování určí sněhovou pokrývkou pouze v případě, kdy leží na větvích stromů a především v jarním období, kdy sníh nejdéle přetrvává právě v lese, je tato hranice pro DPZ takřka neviditelná.

Určení geomorfologických oblastí Česka jako zón pro porovnání nadmořských výšek nulových izochion se jeví jako nejvhodnější, a to jak vzhledem k velikosti a počtu jednotek, tak především k jejich fyzicko-geografickým podmínkám. Rozložení sněhové pokrývky je nejvíce závislé na nadmořské výšce, se kterou je spojena jak nízká teplota potřebná k udržení sněhové pokrývky, tak výskyt sněhových srážek, jejichž pravděpodobnost se s rostoucí nadmořskou výškou zvyšuje. Jistá neobjektivnost se nachází na pomezí oblastí, které jsou tvořeny hřbety nebo naopak prudkými svahy, kde je níže položeným geomorfologickým oblastem přiřazena nulová izochiona, která se vyskytuje pouze na okraji tohoto pomezí, ale v obdobných nadmořských výškách jinde v oblasti se již nevyskytuje. K této situaci dochází například na Ještědsko-kozákovském hřbetu na pomezí Krkonošské oblasti a Severočeské tabule, respektive na jižních svazích Krušných hor na pomezí Krušnohorské hornatiny a Podkrušnohorské oblasti.

Verifikace nulové izochiony pomocí interpolace SWE se jeví jako poměrně přesná, ale vzhledem ke značnému progresu vyhodnocování vlastností sněhové pokrývky vychází z měření za pouhé dvě zimní sezony, protože následně byl výpočet již ovlivněn alespoň přibližnou definicí nulové izochiony a obě metody se tak staly na sobě závislé. Význam nulové izochiony pro potřeby ČHMÚ popisuje Tučková a kol. (2012) a za hlavní zdroj nepřesnosti lze označit rozdílné vlastnosti sněhu během zimy, kdy i přes velmi hustou pozorovací síť stanic nelze přesně zmapovat rozložení sněhu na území Česka. Přesnost určení hranice sněhové pokrývky je závislá na fázi zimního období, kdy na začátku zimy má sníh velmi malou hustotu a v nižších polohách je nezměřitelný a naopak na konci zimy je distribuce sněhové pokrývky ovlivněna expozicí svahu v místě měření. Obecně lze však konstatovat, že při porovnání se snímkem DPZ interpolační metoda SWE

Obr. 6 – Hranice sněhové pokrývky během fáze akumulace sněhu (2. 12. 2013)

používaná ČHMÚ v době akumulace sněhu spíše podhodnocuje rozsah území se sněhovou pokrývkou (obr. 6) a v období tání naopak interpoluje sních i do oblastí, kde může být vzhledem k místním fyzicko-geografickým podmínkám již roztátý (obr. 7). Ve zkoumaném případě ze dne 24. 2. 2014 tvořila plocha extrahovaná ze snímků DPZ přibližně 60 % plochy vygenerované interpolační metodou ČHMÚ. Právě na charakterizování hlavních rozdílů mezi obdobím akumulace a tání sněhové pokrývky bude zaměřen další navazující výzkum, na který je ovšem nezbytné nashromáždit dostatečný počet vhodných pozorování, aby byla vypovídající hodnota srovnání objektivní. Stanovená limitní hranice 5 mm SWE značně redukuje oblast se sněhovou pokrývkou v době akumulace čerstvého sněhu. Naopak na jaře v období tání lze tuto hodnotu považovat za objektivní rozmezí mezi souvislou sněhovou pokrývkou a naopak silně rozbředlým sněhem, který se na povrchu dlouhodobě neudrží. Problematiku stanovení hranice potvrzuje i srovnání snímků MODIS se sítí SNOTEL (*snowpack telemetry*) na západě USA, kde při výšce sněhu do 2 cm byla shoda v méně než 50 % pozorování (Klein, Barnett 2003).

Při porovnání s Alpínskou hranicí lesa nalezneme obdobný trend jen v menším rozsahu. Pro Krkonoše je udávána průměrná výška Alpínské hranice lesa 1 230 m n. m., zatímco v ostatních východosudetských pohořích je položena stejně jako nulová izochionna výše. V Hrubém Jeseníku v 1 310 m n. m. a na

Obr. 7 – Hranice sněhové pokrývky během fáze tání sněhu (24. 2. 2014)

Kralickém Sněžníku v 1 305 m n. m. (Treml, Banaš 2000). Posledním českým pohořím, kde je Alpinská hranice lesa definována, je Šumava, kde se dle Banaše (2004) nachází maximálně v 1 450 m n. m. Lze tedy konstatovat, že výškový rozdíl mezi Alpinskou hranicí lesa a nulovou izochionou na Šumavě a v Krkonoších je téměř stejný, a to 220 m.

Pro přesnější zhodnocení polohy nulové izochiony na základě snímků MODIS je třeba získat ještě delší řadu pozorování. Především bezoblačné situace za období, kdy je převážná část území Česka pokryta sněhem, slouží nejlépe k vzájemnému porovnání geomorfologických oblastí. Přesnost snímkování MODIS je pak udávána i 93 % (Hall, Riggs 2011). Takových situací bylo za zimu 2010/2011 celkem 5, za zimu 2011/2012 celkem 7 a za zimu 2012/2013 celkem 9, což je 21 z celkem 67 vyhodnocovaných týdnů, tedy 31 % situací. Častější využití této metody umožňuje kombinace satelitních snímků z nejbližších dnů, kdy lze za stabilního stavu sněhové pokrývky spojit více snímků dohromady. Vzhledem k rozdílným vlastnostem sněhové pokrývky během období akumulace a tání je preferováno další analýzy provádět odděleně, protože průměr za celé období sledování sněhové pokrývky může být zkreslující. Především jarní období, kdy sníh přetrvává jen v nejvyšších polohách a hranice pokrývky je relativně ostrá, nabízí značný potenciál pro porovnání polohy nulové izochiony v rámci našich pohoří.

Závěr

Poloha nulové izochiony se stává nedílnou součástí modelu pro výpočet vodních zásob ve sněhu a její implementace se každoročně vyvíjí pro dosažení co nejpřesnějších výsledků. Význam výzkumu je v pojmenování a kvantifikování rozdílů v poloze nulové izochiony v rámci geomorfologických oblastí Česka, které doposud nebylo takto komplexně předloženo. Odůvodnění těchto vztahů na základě fyzicko-geografických podmínek a následné srovnání s obdobnými výzkumy v zahraničí je příslibem dalšího výzkumu. Nabízí se především srovnání s pohořími ve stejných klimatických podmínkách střední Evropy (Slovensko, Rakousko). Další rozvoj tématu bude zaměřen na rozdílné podmínky během období akumulace a tání, na kterých půjde dokumentovat zásadní faktory, které určují jednotlivé výškové rozdíly v poloze nulové izochiony v českých regionech.

Literatura:

- ANDREADIS, K. M., LETTENMAIER, D. P. (2006): Assimilating remotely sensed snow observations into a macroscale hydrology model, *Advances in Water Resources*, 29, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309170805002058>, s. 872–886.
- BALATKA, B., KALVODA J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. *Geomorphological regionalization of the relief of Bohemia*. Kartografie Praha a. s., Praha, 79 s., 3 mapy.
- BANAŠ, M. (2004): Alpínská hranice lesa – významná dělicí linie horských ekosystémů. Katedra ekologie a životního prostředí, UPOL Olomouc, <http://ekologie.upol.cz/ku/hoek/prezentace/hory3.pdf> (4. 2. 2012).
- BAVERA, D., BAVAY, M., JONAS, T., LEHNING, M., De MICHELE, C. (2014): A comparison between two statistical and a physically-based model in snow water equivalent mapping, *Advances in Water Resources*, 63, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030917081300242X>, s. 167–178.
- BERCHA, Š. (2011): Zlepšení vstupních dat pro výpočet vodních zásob ve sněhové pokrývce v ČHMÚ. In: Holko, L. (ed.): XVI. Medzinárodné stretnutie snehárov. Ústav hydrologie, SAV, Liptovský Mikuláš, s. 1–5.
- DUCHÁČEK, L. (2009): Hydrologický režim Labského dolu. Diplomová práce. KFGG, PrF UK. Praha, 92 s.
- DURAND, M., MOLOTCH, N. P., MARGULIS, S. A. (2008): Merging complementary remote sensing datasets in the context of snow water equivalent reconstruction, *Remote Sensing of Environment*, 112, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425707003999>, s. 1212–1225.
- HALL, D. K., RIGGS, G. A. (2007): Accuracy assessment of the MODIS snow-cover products. *Hydrological Processes*, 21, s. 1534–1547.
- HALL, D. K., RIGGS, G. A., SALOMONSON, V. V., DiGIROLOMO, N. E., BAYR, K. J. (2002): MODIS snow-cover products, *Remote Sensing of Environment*, 83, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425702000950>, s. 181–194.
- HANTEL, M., MAURER, CH. (2011): The median winter snowline in the Alps. *Meteorologische Zeitschrift*, 20, s. 267–276.
- HARSHBURGER, B. J., HUMES, S. H., WALDEN, Von P., BLANDFORD, T. R., MOORE, B. C., DEZZANI, R. J. (2010): Spatial interpolation of snow water equivalency using surface observations and remotely sensed images of snow-covered area. *Hydrological processes*, 24, s. 1285–1295.
- JENÍK, J. (1961): Alpínská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku. Academia, Praha, 407 s.

- KLEIN, A. G., BARNETT, A. C. (2003): Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000–2001 snow year, *Remote Sensing of Environment*, 86, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442570300097X>, s. 162–176.
- KLEINDIENST, H., WUNDERLE, S., VOIGT, S. (2000): Snowline analysis in the Swiss Alps based on NOAA-AVHRR satellite data. *Remote Sensing of Land Ice and Snow (Proceedings of the EARSeL Workshop)*, Dresden, s. 297–307.
- KOCUM, J., JELÍNEK, J., JENÍČEK, M. (2009): Monitoring sněhové pokrývky a vyhodnocení sněhových zásob na Šumavě a v Krušných horách. In: Hanková, R., Klose, Z., Pavlásek, J. (eds.): XIV. Medzinárodné stretnutie snehárov. Sborník příspěvků ze semináře 18.–20. 3. 2009. ČZÚ v Praze, Praha, s. 105–113.
- KUTLÁKOVÁ, L., JENÍČEK, M. (2012): Modelování akumulace a tání sněhu v povodí Bystřice v Krušných horách. *Geografie*, 117, č. 1, s. 110–125.
- PARAJKA, J., PEPE, M., RAMPINI, A., ROSSI, S., BLÖSCHL, G. (2010): A regional snowline method for estimating snow cover from MODIS during cloud cover. *Journal of Hydrology* 381, s. 203–212.
- SEIDEL, K., EHRLER, C., MARTINEC, J., TURPIN, O. (1997): Derivation of statistical snowline from high-resolution snow cover mapping. In: *Remote Sensing of Land Ice and Snow. Proceedings of the EARSeL Workshop*, Freiburg, s. 31–36.
- SOBÍŠEK, B., ed. (1993): Meteorologický slovník výkladový terminologický: s cizojazyčnými názvy hesel ve slovenštině, angličtině, němčině, francouzštině a ruštině. Academia, Praha, 594 s.
- SPAZIEROVÁ, K., BRODSKÝ, L. (2011): Operační monitoring sněhové pokrývky z dat DPZ. In: Holko, L. (ed.): XVI. Medzinárodné stretnutie snehárov. Ústav hydrológie SAV, Lipovský Mikuláš, s. 74–81.
- TUČKOVÁ, K., BERCHA, Š., DUCHÁČEK, L., JIRÁK, J., BRODSKÝ, L. (2012): Detekce nulové izochiony pomocí družicových snímků MODIS v rámci České republiky. In: Jeníček, M., Kučerová, D. (eds.): XVII. Medzinárodné stretnutie snehárov. Univerzita Karlova v Praze, Rejvíz, Hrubý Jeseník, s. 30–38.
- ŠERCL, P. (2008): Hodnocení metod odhadu plošných srážek. *Meteorologické zprávy*, 61, č. 2, s. 33–43.
- TREML, V., BANAŠ, M. (2000): Alpine Timberline in the High Sudeties. *AUC–Geographica*, 35, s. 83–99.

S u m m a r y

VERTICAL VARIABILITY IN THE POSITION OF THE ZERO ISOCHION IN GEOMORPHOLOGIC REGIONS OF CZECHIA

Determination of the zero isochion is a helpful tool for evaluation of snow cover characteristics for hydrological purposes. In Czechia, the position of the zero isochion oscillates according to certain regularities, which can be found out through a comparison of Czech geomorphologic regions. Hand in hand with the progress in Remote Sensing observations, images from satellites are easier to obtain; therefore data from more than three winter seasons could be analyzed in this research.

Extraction of the zero isochion is processed in the ArcGIS environment, where MODIS (the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) scenes are classified first, and the line between snow covered areas and uncovered areas is selected afterwards. This line is used as a mask above DEM (Digital Elevation Model) of a 25 m spatial resolution and all the pixels which are crossed by this layer are extracted. Subsequently, the “Zonal statistic” tool is applied on these pixels, while Czech geomorphologic regions are set as the zones. By this analysis, the average elevation of the zero isochion is determined for every satellite scenario, where at least one third of the territory of Czechia was not covered by clouds. Geomorphologic regions seem to fit our purposes best, because they mirror the orographic conditions as well as temperature and precipitation conditions, which are crucial for snow accumulation and ablation.

Altogether, 67 situations were analyzed, which translated into a total of 6,181 regional comparisons. Even the zero isochion for Czechia as a whole varies considerably (theoretically 504 m) and detailed analyses show exact differences and trends. According to the results, the highest average position of the zero isochion can be found in the Šumava Mountains. The zero isochion in the Ore Mountains and the Českomoravská vrchovina highland would lay about 100 m lower and in the Giant Mountains region, the zero isochion would be found at its lowest position, about 200 m lower than in the Šumava Mountains. These differences apply best to late winter situations, when snow is transformed and better classified by Remote Sensing.

The obtained results were verified by an interpolation of SWE (Snow Water Equivalent) data, which is based on wide database of field measurements from CHMI (Czech Hydrometeorological Institute). 5 mm SWE isoline was set as the border line, because it best differentiates old snow from the melted snow and reduces new soft snow cover. The same trends in the position of the zero isochion in the Czech mountains were confirmed by research on the alpine forest line. Outputs of the study will be developed further in the next phase of research. The author will look for the reasons for the variability, with focus on synoptic situations and mountain orientation.

Fig. 1 – Station network of CHMI used for evaluating water volume in snow, December 2013. In legend from top: profile measurements, auxiliary stations, operation stations, snow-measuring stations.

Fig. 2 – Geomorphologic sub provinces and regions of Czechia. Source: Balatka 2006, adjusted. In legend from top: borders of Czechia, geomorphologic subprovinces geomorphologic regions.

Fig. 3 – Variability of the zero isochion from Remote Sensing data. Source: Tučková 2012, adjusted. In legend: maximum, minimum, mean.

Fig. 4 – Box plot showing position of the zero isochion compared to the zero isochion in the Giant Mountains region in the elevation of 500 m a.s.l. In legend: altitude interval, Max value, Min value, average value of the isochion.

Fig. 5 – Elevation differences of the zero isochion in geomorphologic regions compared to the Giant Mountains region; Axis x – results from Remote Sensing, Axis y – results from SWE interpolation.

Fig. 6 – Border of snow cover area during the accumulation phase. In legend: snow cover limits according to Remote Sensing, interpolated snow cover over 5 mm SWE.

Fig. 7 – Border of snow cover area during the melting phase. In legend: snow cover limits according to Remote Sensing, interpolated snow cover over 5 mm SWE.

Pracoviště autora: Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Albertov 6, 128 43 Praha 2; Český hydrometeorologický ústav, oddělení hydrologického výzkumu, Želivského 5, 466 05 Jablonec nad Nisou; e-mail: LiborDuchacek@seznam.cz.

Do redakce došlo 22. 4. 2013; do tisku bylo přijato 2. 5. 2014.

Citační vzor:

DUCHÁČEK, L. (2014): Vertikální variabilita polohy nulové izochiony v rámci geomorfologických oblastí Česka. *Geografie*, 119, č. 2, s. 145–160.