

Nulová izochiona v rámci geomorfologických oblastí Česka: její určení ze snímků MODIS a její dynamika

LIBOR DUCHÁČEK, ONDŘEJ LEDVINKA

Klíčová slova: dálkový průzkum Země (DPZ) – geografické informační systémy (GIS) – sněhová pokrývka – zásoby vody ve sněhu – hydrologie ČHMÚ – geomorfologie Česka

SOUHRN

Od prosince 2012 je pro potřeby operativní hydrologie v Českém hydrometeorologickém ústavu (ČHMÚ) pravidelně pro každou zimní sezonu určována poloha nulové izochiony (sněhové čáry). Důvodem je odhad zásob vody ve sněhové pokrývce, s nimiž čeští hydrologové musejí nutně pracovat, pokud chtějí, aby jejich předpovědní modely poskytovaly relevantní výsledky. Pro lepší představu o aktuální prostorové distribuci sněhové pokrývky v Česku je informace o nulové izochioně odvozována ze snímků MODIS pořízených družicí Terra. Získaná časová řada reprezentuje již poměrně dlouhé období (nyní až do května 2021), a tak se nabídl možnost analýzy prostorové a časové dynamiky nulové izochiony v Česku. V této studii byla informace o izochioně rozdělena do 27 geomorfologických oblastí, přičemž zimní sezona byla začleněna také do období akumulace a tání sněhu. Snahou bylo zjistit, jaké jsou rozdíly mezi oblastmi a jednotlivými obdobími a jaké jsou vazby dynamiky nulové izochiony na vybrané faktory odvozené z dalších geografických dat, jako je digitální model reliéfu apod. Data o izochioně byla z nejrůznějších důvodů neúplná a nevyhovovala nasazení modelů, které vyžadují pravidelné rozestupy v čase. Proto bylo přistoupeno k odhadu chybějících denních hodnot tak, aby byly pravidelně pokryty zimní sezony vždy od listopadu do května. To bylo provedeno vhodnou modifikací EM algoritmu, jež zohledňuje jak strukturu časové řady, tak prostorové vazby. Následně byla aplikována korelační a regresní analýza, při níž bylo hlavním cílem zjistit, do jaké míry má vliv příslušnost ke geomorfologické oblasti (s jejími vybranými atributy) a zda dochází k signifikantním meziročním změnám.

ÚVOD

Nulová izochiona je již více než deset let praktickým pomocníkem při výpočtech zásob vody ve sněhu v rámci pravidelných hydroprognózních analýz pod hlavičkou ČHMÚ. Hlavním přínosem určování této izochiony je vymezení prostoru, kde lze předpokládat výskyt sněhové pokrývky a kde naopak sněhová pokrývka bude chybět, respektive kde lze počítat s vodní hodnotou sněhu a kde nikoli. Definování takové hranice v rámci homogenních regionů Česka umožňuje lépe interpolovat hodnoty výšky sněhové pokrývky zaznamenané ve staniční síti ČHMÚ. Bližší popis hydroprognózních analýz, včetně aplikace nulové izochiony při výpočtech, nabízí [1, 2]. Obsah tohoto článku navazuje na práci [3], kde byly shrnuty základní postupy extrakce nulové izochiony pomocí družicových snímků a informace o jejím rozložení v rámci geomorfologických

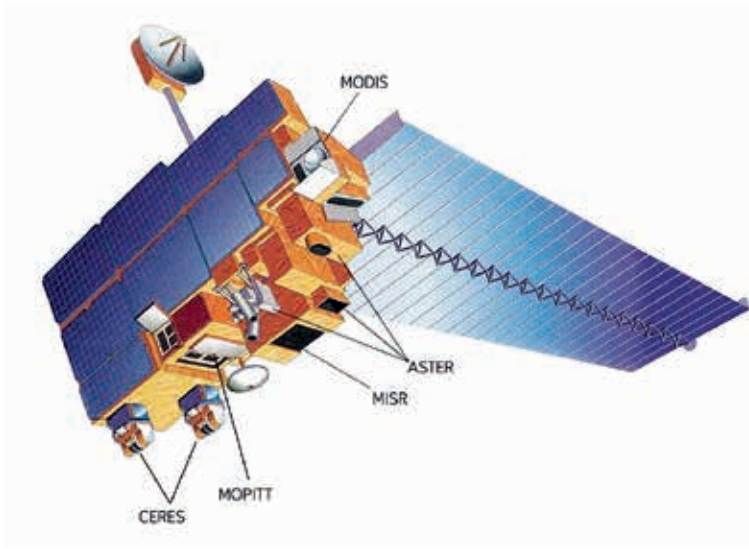
oblastí Česka. Právě hledání korelací a dalších vazeb, které se dají ze sledované řady vypočítat, jsou nosným tématem následujícího textu. Jednou ze stěžejních oblastí studia je kvantifikace míry závislosti variability průměrné nadmořské výšky nulové izochiony na terénních charakteristikách geomorfologických oblastí. Analyzována je jak dlouhodobá nadmořská výška nulové izochiony za celé zimní období vymezené měsíci listopadem až květnem (pro devět let 2013–2021), tak i v částech zimní sezony typických pro akumulaci sněhu, pro jeho tání a ve zbylé části této sezony (pro čtyři roky 2018–2021). Snahou bylo vysledovat míru působení faktorů souvisejících s konfigurací terénu v jednotlivých obdobích zimní sezony. Jelikož délka nasbírané časové řady je již poměrně dostačující (ve smyslu nečleněné zimní sezony), neméně důležitým úkolem bylo zjistit, jak se mění nadmořská výška nulové izochiony s časem, tj. v jednotlivých letech, a zda lze vypočítat významný trend u některých geomorfologických oblastí. Při extrakci nadmořské výšky nulové izochiony a respektování její definice dle [4] bylo z důvodu nutné konzistence postupováno obdobně jako v [3]. Řešení nových úkolů bylo provedeno s využitím nejrůznějších statistických technik, přičemž kromě deskriptivní statistiky a metod pro doplňování chybějících hodnot hrála ústřední roli regresní analýza a výběr významných vysvětlujících proměnných.

DATA A METODIKA

Družicová data

Podstatná část dat analyzovaných v rámci tohoto projektu pochází z portálu Národního střediska sněhu a ledu (National Snow and Ice Data Center, dále NSIDC), které podporuje výzkum kryosféry, tedy sněhu, ledu, ledovců a zmrzlé půdy, ale i klimatických interakcí, jež v kryosféře probíhají. NSIDC spravuje a distribuuje vědecká data, vytváří nástroje pro přístup k datům, podporuje uživatele dat, provádí vědecký výzkum a vzdělává veřejnost o kryosféře. Jako platforma dat pocházejících z Národního úřadu pro letectví a vesmír (National Aeronautics and Space Administration, NASA) je zároveň certifikována coby tzv. CoreTrustSeal s osvědčením Pravidelný člen Světového datového systému, mezinárodního orgánu Mezinárodní vědecké rady (International Science Council, ISC; dříve ICSU). Portál distribuuje data bezplatně celé vědecké komunitě již od roku 1976 v rozmanitých formátech známých v oblasti DPZ a ve velkosti od malých textových souborů po terabyty dat. Bližší informace o produktech, nástrojích i publikovaných výstupech lze dohledat na [5].

Konkrétní datová sada využitá pro účely analýzy nulové izochiony je označena jako MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m, Version 61 a je včetně metadat dostupná z [6]. Název sady obsahuje základní popisné údaje o snímacích datech. Snímky jsou sbírány pomocí senzoru MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), který je instalován na družici Terra. Terra je nadnárodní vědecký výzkumný satelit NASA na sluneční synchronní oběžné dráze kolem Země, jenž provádí simultánní měření zemské atmosféry, půdy a vody, aby přispěl k pochopení, jak se Země mění, a identifikoval důsledky pro život na Zemi [7]. Umístění senzoru MODIS na družici Terra ukazuje obr. 1.



Obr. 1. Družice Terra, vypuštěná 18. prosince 1999 (výška oběžné dráhy: 713 km; rychlost na oběžné dráze: 7 503 km·s⁻¹; maximální rychlost: 27 010 km·h⁻¹) a poloha senzoru MODIS (zdroj: [8])

Fig. 1. Terra satellite, launched 18th December 1999 (orbit height: 713 km; orbital velocity: 7 503 km·s⁻¹; maximum velocity: 27 010 km·h⁻¹) and the position of the MODIS sensor (source: [8])

Snímky označené identifikátorem MOD10_L2 poskytují informaci o sněhové pokrývce v denním kroku. Detekce probíhá pomocí normalizovaného diferenčního sněhového indexu (Normalized Difference Snow Index, NDSI). Dalším produktem je série korekčních snímků určených ke zmiřnění chyb a označení detekce nejisté sněhové pokrývky. Zasněžená krajina má obvykle velmi vysokou odrazivost ve viditelných pásmech a velmi nízkou odrazivost pro krátkovlnná infračervená pásma. NDSI odhaluje velikost tohoto rozdílu. Každá datová granule obsahuje 5 minut dat ze svazku pozorovaných v rozlišení 500 m. Sběr dat byl zahájen 24. února 2000 a v současnosti probíhá revize dat pro aktuální verzi 61, která by měla být dokončena na jaře 2022.

Stažení družicových dat a jejich zpracování v prostředí GIS

Praktická stránka zpracování těchto dat v ČHMÚ spočívá v přednastavení parametrů zájmové oblasti na obdélník překrývající území Česka. Pokud je pořízený snímek v průniku s tímto obdélníkem, jsou v nejbližším termínu pracovníci ČHMÚ e-mailem informováni o jeho dostupnosti s odkazem ke stažení daného datového souboru. Termín zaslání závisí na komplexnosti snímku. V případě, že se snímek vyznačuje velkým množstvím tříd, může docházet ke zpoždění. Nejčastěji však bývají notifikace zaslány do 12 hodin od pořízení.

Data jsou poskytována ve formátu HDF-EOS2 a jsou ukládána jako 8bitová celá čísla bez znaménka. Datový formát HDF (Hierarchical Data Format) umožňuje efektivně ukládat rozsáhlá, a přitom poměrně rozmanitá data a metadata [9].

Tab. 1. Třídy výstupu NDSI_Snow_Cover

Tab. 1. Classes of the NDSI_Snow_Cover output

NDSI sněhová pokrývka a hodnoty datových vlaječek (uložené jako 8bitové hodnoty bez znamének)

0-100: NDSI sněhová pokrývka

200: chybějící data

201: bez rozhodnutí

211: noc

237: vnitrozemská voda

239: oceán

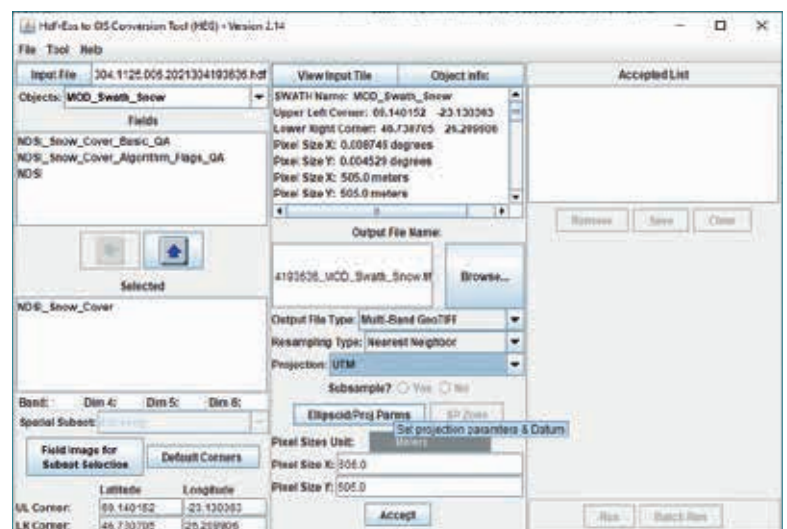
250: oblačnost

254: nasycený detektor

255: vyplnění

Pro zájmovou oblast zahrnující území Česka je velikost takových souborů přibližně 5–25 MB, což odráží plochu a prostorovou distribuci sněhu v krajině. Každý HDF soubor je složen z několika parametrů, z nichž je pro detekci sněhu zásadní výstup „NDSI_Snow_Cover“, který obsahuje příznaky rozdělené do devíti tříd uvedených v tab. 1.

Pro navazující práci v prostředí GIS je nutné extrahovat jednotlivé třídy nejprve do rastrové podoby a následně do polygonů, z nichž je využita zásadní hranice mezi oblastí se sněhem a bez sněhu. V první fázi extrahování je nutné použít nástroj HEG (HDF-EOS To GeoTIFF Conversion Tool), který je volně dostupný jako podpůrný software z portálu NASA [10]. Umožňuje dostatečně přesnou konverzi z HDF formátu do GeoTIFF formátu tak, aby při projekci UTM a zadání odpovídající zóny (pro Česko 33N, nebo 34N na východě) došlo k plnohodnotnému překryvu s českým digitálním modelem reliéfu (DMR; k němu viz dále). Nejlepším ověřením kvality překryvu jsou lokální odrazy ve třídě 237, tedy vnitrozemské vodní plochy, které lícují s hydrografickým podkladem v GIS (např. vodní nádrže Rozkoš nebo Nové Mlýny). Příklad nastavení nástroje HEG znázorňuje obr. 2.



Obr. 2. Nastavení parametrů pro konverzi v nástroji HEG

Fig. 2. Parameter settings for conversion in the HEG tool

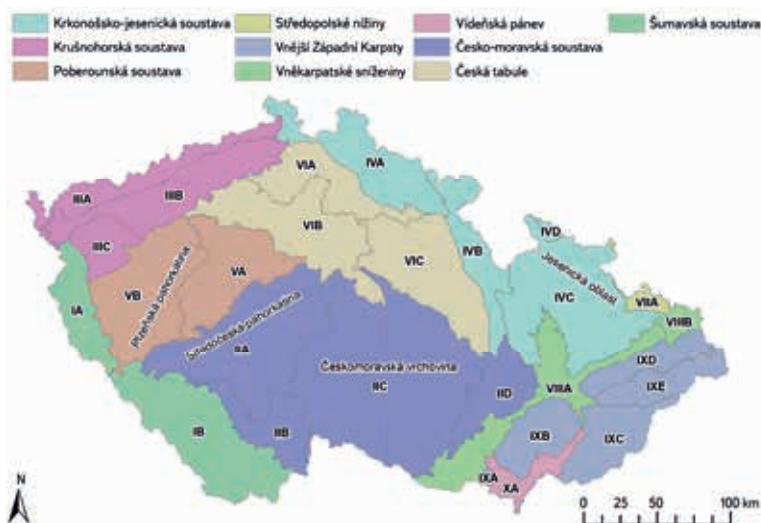
Zpracování snímků v prostředí ArcGIS Desktop lze rozdělit do několika fází, přičemž použití jednotlivých nástrojů se přizpůsobuje možnostem licence ArcGIS Desktop v rámci ČHMÚ a do budoucna lze též předpokládat adaptaci na novější verze a produkty:

A. Extrakce zájmových dat ze snímku DPZ. Snímek ve formátu GeoTIFF je importován s parametry nastavenými v nástroji HEG (projekce, rozsah). Nejčastěji je pro oblast Česka pořízen snímek v dopoledních hodinách, jenž obsahuje území přibližně od jižní Skandinávie po oblast Alp. V méně častých případech lze použít i snímky jen s částečným překryvem, což vychází z orbitální dráhy družice, která území Česka může zaznamenat z více přeletů. Snímky, jež mají průnik s přednastavenou obdélníkovou maskou pro Česko, jsou podrobeny ořezu, aby se snížila náročnost dílčích výpočtů. Získaný rastr je nutné nejprve reklasifikovat s ohledem na vymezení oblastí se sněhem a bez sněhu. Původní data do roku 2017 byla koncipována obecněji do tří základních tříd: sníh, bez sněhu a oblačnost. Po roce 2017 je již kvalita odrazu ze sněhové pokrývky rozdělována detailněji do tříd o hodnotách 0 až 100 (dle indexu NDSI), kde 0 je zaručená oblast bez sněhu a 100 je nejvyšší možná odrazivost od sněhové pokrývky. Pro účely hydrologie ČHMÚ jsou veškeré hodnoty pro odraz sněhu v rozmezí 1 až 100 považovány jako sníh, aby bylo možné získat co největší balík dat pro vyhodnocení nulové izochiony. Ve výsledku jsou tedy všechny hodnoty 1–100 překlasičkovány do hodnoty 50 a hodnoty 0 jsou brány jako území bez sněhu. Významným prvkem vycházejícím z aktuálních podmínek počasí je třída o hodnotě 201, což je území se sporným vyhodnocením (interní výpočet NDSI), a třída o hodnotě 250, což je oblačnost, která je nejčastějším limitujícím faktorem pro plnohodnotné vyhodnocení. Ostatní třídy lze považovat za doplňkové a je možné je z dalších operací vynechat. Reklasifikovaný rastr je ještě generalizován nástrojem Boundary Clean, aby byly potlačeny dílčí mikroregiony o velikostech jednotek pixelů, a poté jsou třídy barevně označeny, aby vynikl primární vizuální přehled o datové sadě. Pro další operace je nejprve nutné převést rastrovou vrstvu na polygonovou a tu následně na liniovou pomocí nástroje Feature to Line. Takto vznikne datová sada linií, jež mají specifický gridcode dle původního rastru, který obklopovaly. Konkrétně, na kontaktu dvou polygonů, kde jeden je o hodnotě 0 (bez sněhu) a druhý o hodnotě 50 (sníh), vzniknou dvě linie, jedna s gridcode 0 a druhá s gridcode 50. Hledaným prvkem je následně vrstva, která vznikne průnikem výběrů (nástroj Intersect) těchto dvou linií a obsahuje všechny viditelné hranice mezi oblastmi se sněhem a bez sněhu. Tuto nesouvislou linii ohraničující zaznamenanou sněhovou pokrývkou lze označit za nulovou izochionu. Tato linie již poskytuje jistou prostorovou představu o pozici hranice sněhu v rámci území Česka. Pro bližší údaj o pozici je nutné najít přibližnou hodnotu nadmořské výšky, v níž se tato linie nachází. Jako nejjednodušší metoda byla zvolena extrakce pixelů pomocí masky, kde za masku je považována právě linie izochiony. Takto jsou extrahovány hodnoty nadmořské výšky z rastrového podkladu, kterým je DMR o rozlišení 25 m (viz dále).

B. Prostorová analýza dat. Jako nevhodnější dělení území Česka byly pro potřeby definice nulové izochiony zvoleny geomorfologické oblasti. Ty nejlépe odrážejí vlastnosti reliéfu, relativní i absolutní členitost (pohoří/nížiny) a rozdělení orientace svahů k jednotlivým světovým stranám (sever/jih, západ/východ), tedy faktory, u nichž je předpokládán zásadní vliv na akumulaci a tání sněhové pokrývky. V rámci Česka je takových zpracovávaných oblastí 27 (bližší viz tab. 2 a obr. 3). Pro každou z těchto oblastí je pomocí nástroje Zonal Statistics as Table vyhodnocen extrahovaný soubor pixelů příslušející dané geomorfologické oblasti a výstupem je statistika obsahující informace o počtu pixelů, jejich minimální a maximální hodnotě, rozsahu hodnot, sumě hodnot a především průměrné hodnotě, což je položka, se kterou je následně pracováno. Vektorová vrstva geomorfologických oblastí doplňuje funkci databáze poloh nulové izochiony, jelikož pro každý analyzovaný den je vytvořen sloupec hodnot, kde je každé geomorfologické oblasti přiřazena hodnota průměrné polohy, pokud v daný den byla zaznamenána. Pro

propojení statistického výstupu s atributovou tabulkou vrstvy oblastí je použit nástroj Join Field.

C. Vizuální interpretace dat. Vizualizaci hodnot lze provést pomocí labelingu hodnot pro jednotlivé oblasti, případně i s podbarveným kartogramem. Situace, kdy je definována průměrná hodnota pro každou nebo alespoň pro většinu geomorfologických oblastí, je během pozorování spíše výjimečná, neboť se často projevuje faktor oblačnosti a při absenci oblačnosti je sníh buď omezen jen na horské oblasti, nebo naopak pokrývá celé území Česka. Jak již bylo zmíněno výše, hranice sněhu vychází z různé intenzity indexu odrazivosti NDSI a každou z průměrných hodnot je potřeba podrobit kritické analýze (neboli validovat), zda jde o objektivní hodnotu a zda může reprezentovat podmínky v dané oblasti. Při posouzení se vychází nejen z interních dat o sněhové pokrývce pocházejících z pozorovací sítě ČHMÚ (automatické stanice, pozorovatelé, terénní měření), ale například i z výstupů webových kamer nebo historické korelace mezi oblastmi. Do výpočtu zásob vody ve sněhu vstupuje poloha nulové izochiony jako limitní hodnota pro prostorovou interpolaci parametrů sněhové pokrývky, kdy je pro každou z oblastí vygenerována virtuální síť nulových bodů, jež zamezuje interpolaci odhadovat nenulovou (kladnou) výšku sněhové pokrývky nebo vodní hodnotu sněhu pod touto pozicí. Pro tuto analýzu v prostředí GIS se používá nástroj ClidataGIS, který umožňuje import naměřených dat, jejich detailnější vizuální kontrolu i nastavení parametrů pro interpolaci. Finálním výstupem je mapa včetně doplňující tabulky zohledňující změny ve výskytu sněhu v předchozích týdnech, jež je vyvěšena na portálu ČHMÚ, a veřejnost se zde může seznámit s předpokládaným objemem vody v dílčích zájmových povodích (vodní nádrže, významné závěrové profily vodních toků). Aktuálně je takový výstup, vycházející z pondělních změřených hodnot, generován jednou týdně, a to v úterý. Do budoucna bude ovšem díky automatizované síti sněhoměrných stanic v kombinaci se satelitními snímky možné zpracovat podobné analýzy i častěji během týdne.



Obr. 3. Geomorfologické oblasti (pro ID viz tab. 2) a jejich nadřazené subprovincie v Česku (upraveno podle [11])

Fig. 3. Geomorphological regions (for ID see tab. 2) and their parent subprovinces in Czechia (adapted from [11])

Základní geografické podklady pro získání terénních vysvětlujících proměnných

Na prostorovou (ale i časovou) variabilitu nadmořské výšky nulové izochiony má vliv konfigurace terénu. Časová variabilita bude jistě více spjata s klimatickými podmínkami územních celků, pro které je studium prováděno. Vzhledem

Tab. 2. Geomorfologické oblasti, pro které je v ČHMÚ v zimní sezoně určována průměrná nadmořská výška nulové izochiony, a jejich identifikátory (upraveno podle [11])
 Tab. 2. Geomorphological regions for which, in the winter season, the CHMI determines the average altitude of the zero isochion, and their identifiers (adapted from [11])

ID	Oblast/Region	Subprovincie/Subprovince	Provincie/Province	Systém/System
IA	Českoleská oblast	Šumavská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IB	Šumavská hornatina	Šumavská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIA	Středočeská pahorkatina	Česko-moravská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIB	Jihočeské pánve	Česko-moravská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIC	Českomoravská vrchovina	Česko-moravská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IID	Brněnská vrchovina	Česko-moravská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIIA	Krušnohorská hornatina	Krušnohorská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIIB	Podkrušnohorská oblast	Krušnohorská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IIIC	Karlovarská vrchovina	Krušnohorská soustava	Česká vysočina	Hercynský
IVA	Krkonošská oblast	Krkonoško-jesenická soustava	Česká vysočina	Hercynský
IVB	Orlická oblast	Krkonoško-jesenická soustava	Česká vysočina	Hercynský
IVC	Jesenická oblast	Krkonoško-jesenická soustava	Česká vysočina	Hercynský
IVD	Krkonoško-jesenické podhůří	Krkonoško-jesenická soustava	Česká vysočina	Hercynský
IXA	Jihomoravské Karpaty	Vnější Západní Karpaty	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
IXB	Středomoravské Karpaty	Vnější Západní Karpaty	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
IXC	Slovensko-moravské Karpaty	Vnější Západní Karpaty	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
IXD	Západobeskydské podhůří	Vnější Západní Karpaty	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
IXE	Západní Beskydy	Vnější Západní Karpaty	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
VA	Brdská oblast	Poberounská soustava	Česká vysočina	Hercynský
VB	Plzeňská pahorkatina	Poberounská soustava	Česká vysočina	Hercynský
VIA	Severočeská tabule	Česká tabule	Česká vysočina	Hercynský
VIB	Středočeská tabule	Česká tabule	Česká vysočina	Hercynský
VIC	Východočeská tabule	Česká tabule	Česká vysočina	Hercynský
VIIA	Slezská nížina	Středopolské nížiny	Středoevropské nížiny	Hercynský
VIIIA	Západní vněkarpatské sníženiny	Vněkarpatské sníženiny	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
VIIIB	Severní vněkarpatské sníženiny	Vněkarpatské sníženiny	Západní Karpaty	Alpsko-himálajský
XA	Jihomoravská pánev	Vídeňská pánev	Západopanonská pánev	Alpsko-himálajský

k tomu, že těmito územními celky byly z výše uvedených důvodů geomorfologické oblasti, bylo nutné získat vektorovou vrstvu s polygony představujícími tyto regiony. Ta byla stažena z Geoportálu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (ČÚZK), kde je součástí databáze Data200 (konkrétně vrstva Popis) [12]. Tato vrstva vychází z geomorfologického členění obsaženého v publikaci [11], jež ve skutečnosti odkazuje na 28 oblastí. V ČHMÚ se však tradičně uvažuje pouze 27 oblastí, neboť Záhorská nížina je sloučena s Jihomoravskou pávní (řádek s ID XA v tab. 2). V tomto smyslu byla také vrstva geomorfologických oblastí před dalšími analýzami upravena.

Digitální model reliéfu (DMR) v podobě rastru, jenž byl zdrojem informací o nadmořské výšce a jiných terénních parametrech v geomorfologických oblastech, vychází z Digitálního modelu území zpracovaného v měřítku 1:25 000 (tzv. DMÚ 25), který ČHMÚ zakoupil v roce 2001 od Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu (VGHMÚř) generála Josefa Churavého. Tento rastr se čtvercovými buňkami o straně 25 m vznikl z původních dat přímo v ČHMÚ, přičemž zásadním pro jeho vytvoření byl výškopis ve formě vrstevnic. DMR tak vznikl vhodnou interpolací tehdy ještě v systému S-42. Ale protože ČHMÚ postupem času přešel na systém UTM zone 33/34N, byl rastr reprojekován

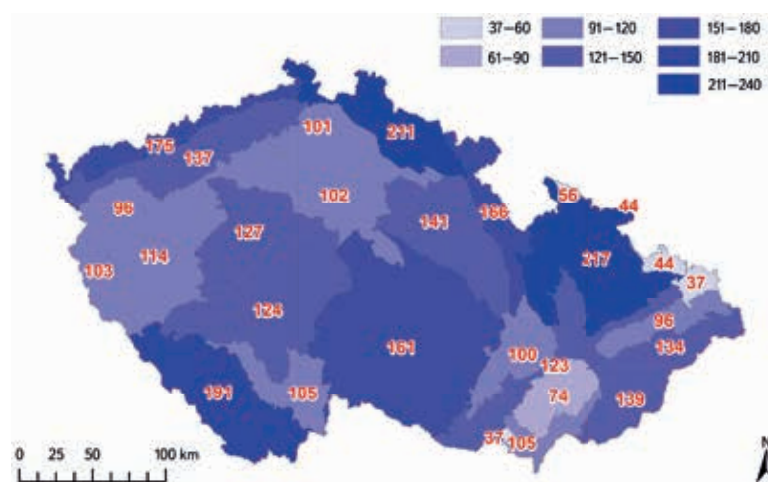
a převzorkován právě do tohoto systému (přesněji pouze pásma 33). Stejně tak byla i geometrie vrstvy polygonů geomorfologických oblastí transformována do systému UTM zone 33N.

Za využití polygonové vrstvy a rastru následovalo extrahování několika charakteristik terénu pro každou geomorfologickou oblast. Ty měly sloužit jako vysvětlující proměnné v plánované regresní analýze. Jejich výčet a význam uvádí tab. 3. Přitom je nutné speciálně upozornit na ukazatel SDASP, který v české literatuře není příliš znám. Jde o tzv. směrovou směrodatnou odchylku odrážející variabilitu orientace svahů v jednotlivých regionech vyjádřenou v radiánech [13]. Pro výpočet charakteristik terénu souvisejících s úhly byl využit R balíček circular [14]. S vektorovou vrstvou bylo při extrakci manipulováno prostřednictvím R balíčku sf [15], s rastrem naopak pomocí R balíčku terra [16].

Statistické zpracování získaných dat o nadmořské výšce nulové izochiony

Obr. 4 prozrazuje, kolik hodnot nadmořských výšek nulové izochiony bylo v původní databázi k dispozici od prosince 2012 do května 2021, kdy již pracovníci ČHMÚ vyhodnocovali data kompletně svépomocí. Informace o nadmořské výšce nulové izochiony byla přirozeně k dispozici pouze za zimní období, která obvykle bývají rozdělena do dvou kalendářních let. Toto rozdělení však není pro další zpracování časových řad příliš vhodné, a proto byly zimní sezony nadále přiřazovány k rokům s větším podílem měsíců. Jelikož za zimní sezonu bylo považováno období listopad až květen, měsíce listopady a prosince byly přiřazeny k následujícím kalendářním rokům. Ve výsledku tedy mohly být zimní sezony analyzovány za období 2013–2021, tedy za devět let. Z nejčastějších důvodů popsaných již dříve nebyla původní databáze pro jednotlivé geomorfologické oblasti kompletní, přičemž dokonce nebyl dodržen ani ekvidistantní týdenní krok, neboť např. z důvodu oblačnosti musel být vybrán některý z následujících bezoblačných dnů v týdnu. Chybějící hodnoty a nedodržení stejného časového kroku činí taková data pro následující statistické zpracování poměrně problematickými, protože naprostá většina statistických modelů vyžaduje úplnost a konstantnost časového kroku (zejména jde-li

o modely časových řad). Přestože se vyvíjejí také modely pro data tohoto typu (např. [17]), obecně je doporučováno zbavit se jejich výše zmíněných nedostatků, aby mohly být aplikovány tradiční modely. Databáze hodnot nadmořských výšek nulové izochiony byla nakonec doplněna odhady hodnot tak, že pro každou geomorfologickou oblast vznikla časová řada v denním kroku, jež bez jediné chybějící hodnoty reprezentovala všechny zimní sezony období 2013–2021. Tohoto výsledku bylo dosaženo prostřednictvím modifikovaného EM (Expectation-Maximization) algoritmu, který s neúplnou časovou řadou zachází jako s řadou vícerozměrnou, kde je tedy uvažován vektor jednorozměrných řad s vazbami mezi nimi a zároveň je na všechny jeho prvky jako filtr aplikována metoda splinů. Mnohem podrobněji je algoritmus popsán v [18], přičemž stejní autoři jej implementovali do R balíčku mtsdi [19], jehož funkce mninput byla také využita pro doplnění chybějících denních hodnot.



Obr. 4. Celkový počet dní (hodnot) s detekovanou nulovou izochionou za všechna období zim 2013–2021

Fig. 4. Total number of days (values) with the detected zero isochion for all winter seasons 2013–2021

Tab. 3. Charakteristiky geomorfologických oblastí Česka získané jako potenciální vysvětlující proměnné pro návaznou regresní analýzu

Tab. 3. Characteristics of geomorphological regions of Czechia obtained as explanatory variables for next regression analysis

Proměnná/Variable	Význam/Meaning
X	souřadnice X centroidu polygonu představujícího geomorfologickou oblast (pro zobrazení UTM zone 33N)
Y	souřadnice Y centroidu polygonu představujícího geomorfologickou oblast (pro zobrazení UTM zone 33N)
MIN	minimální nadmořská výška geomorfologické oblasti odvozená z DMR
MAX	maximální nadmořská výška geomorfologické oblasti odvozená z DMR
RANGE	rozpětí mezi maximální a minimální nadmořskou výškou
MEDIAN	mediánová nadmořská výška geomorfologické oblasti zjištěná z DMR
SD	směrodatná odchylka nadmořských výšek určených pro každou buňku DMR spadající do geomorfologické oblasti
MEDSLOPE	mediánový sklon svahů určený z DMR pro geomorfologickou oblast
MEANASP	průměrná orientace svahů v geomorfologické oblasti (kategorie sever = North, východ = East, jih = South a západ = West) zjištěná z DMR
SDASP	směrodatná odchylka radiánů určujících orientaci svahů v geomorfologické oblasti zjištěná z DMR (podle [13])
PREVASP	převažující orientace svahů v geomorfologické oblasti (kategorie sever = North, východ = East, jih = South a západ = West) zjištěná z DMR

Tab. 4. Hodnoty vybraných terénních vysvětlujících proměnných pro 27 geomorfologických oblastí Česka
 Tab. 4. Values of selected explanatory variables related to terrain of the 27 geomorphological regions of Czechia

Oblast/ Region	X [m]	Y [m]	MIN [m]	MAX [m]	RANGE [m]	MEDIAN [m]	SD [m]	MEDSLOPE [°]	MEANASP	SDASP [rad]	PREVASP
IA	336085,9	5501474,3	371	1039	668	532	96,2	4,12	East	2	East
IB	424956,4	5423466	387	1373	986	704	187,5	6,32	North	2,09	North
IIA	453643,9	5489265,7	190	723	533	453	71,8	3,82	East	2,39	South
IIB	470010	5433611,5	361	576	215	436	35,6	1,15	East	1,94	East
IIC	546326,6	5472446,7	193	836	643	517	99,6	3,62	East	2,4	East
IID	622653,7	5467326,5	186	731	545	386	113,4	4,87	East	2,18	East
IIIA	367418,7	5593028,7	112	1242	1130	651	183,8	6,45	South	2,06	South
IIIB	394800,1	5587386,7	115	929	814	354	136,6	3,82	East	2,03	East
IIIC	347914,8	5546078,6	373	980	607	642	88,7	4,73	East	2,38	North
IVA	522349,7	5617564,5	211	1595	1384	476	211	7,18	South	2,24	South
IVB	600425,4	5562851,7	291	1111	820	485	131,8	5,74	South	2,09	South
IVC	667559,9	5532656,7	200	1491	1291	510	191,4	6,45	East	2,14	East
IVD	649892	5580222,8	220	517	297	307	48,6	2,06	North	1,36	North
IXA	621997,1	5409837,4	159	543	384	250	55,9	5,82	East	2,3	East
IXB	653086,3	5440624,5	162	583	421	269	66,9	5,17	East	2,74	East
IXC	703041	5442909,3	174	1014	840	383	141	7,75	West	2,03	West
IXD	723701,4	5496110,8	206	954	748	327	72,5	3,98	North	1,95	North
IXE	736095,5	5484037,7	268	1318	1050	575	161,9	13,3	West	2,49	West
VA	433084,5	5535094,7	169	861	692	391	122,8	3,62	East	2,08	North
VB	379855	5516508,7	231	770	539	435	71,1	3,43	East	2,24	North
VIA	493822	5599526,8	146	656	510	305	55,9	3,46	South	2,06	South
VIB	478917,2	5567738,2	133	455	322	219	47,3	1,22	East	1,95	East
VIC	570293,1	5545613,1	193	692	499	276	104	1,46	East	2,35	East
VIIA	718084,5	5539710,4	200	316	116	255	22	1,81	East	1,83	East
VIIIA	645831,3	5461667,5	161	382	221	222	31,8	1,15	East	1,76	East
VIIIB	743139,7	5525269,4	192	331	139	240	28,7	1,28	East	1,92	East
XA	651910	5415331,2	145	300	155	177	21,4	0,91	East	2,04	East

Denní hodnoty byly nadále agregovány pro jednotlivé roky (respektive zimní sezony) pomocí alfa-useknutého průměru, aby se předešlo citlivosti na extrémní (blíže k jeho vlastnostem viz např. [20]). Useknuto bylo 10 % extrémních hodnot. Pro roky, u nichž to bylo možné, byly navíc hodnoty agregovány tak, aby reprezentovaly kromě kompletního období (značeného jako KOMPLET) také jednotlivé etapy zimních sezon (tj. AKUMULACE, TÁNÍ a nerozlišitelný ZBYTEK mezi akumulací a táním). Pro definici období akumulace, respektive tání, byl jako referenční použit vývoj sněhové pokrývky v pohraničních horách, především

pak v Krkonoších a Jizerských horách. Nebylo přitom počítáno s možnými překryvy těchto období způsobenými případnými oblevy. Avšak různé trvání jednotlivých období v různých letech bylo zaručeno. Poté došlo taktéž k agregaci přes všechny roky, aby byly získány „dlouhodobé“ hodnoty jako vysvětlované proměnné pro připravované regresní modely. Datumy vymezující období akumulace a tání sněhu přirozeně nebyly ve všech letech stejné, a proto se postupovalo striktně podle toho, co bylo pozorováno kombinací družicových snímků a terénního průzkumu. Pro období TÁNÍ nebylo datum jeho začátku

Tab. 5. Dlouhodobé průměry nadmořské výšky nulové izochiony za zimní období (listopad–květen) pro 27 geomorfologických oblastí Česka
 Tab. 5. Long-term averages of the zero isochion altitude for winter seasons (November–May) for the 27 geomorphological regions of Czechia

Oblast/Region	KOMPLET/ALL (2013–2021) [m]	KOMPLET/ALL (2018–2021) [m]	AKUMULACE/ACCUMULATION (2018–2021) [m]	TÁNÍ/MELT (2018–2021) [m]	ZBYTEK/REST (2018–2021) [m]
IA	616	625	601	648	667
IB	808	808	748	914	782
IIA	450	445	440	454	442
IIB	439	437	439	436	432
IIC	539	537	516	572	545
IID	450	453	445	472	452
IIIA	699	697	626	842	705
IIIB	404	396	388	400	422
IIIC	663	682	654	724	685
IVA	651	638	568	818	573
IVB	612	618	555	750	606
IVC	683	678	570	873	699
IVD	351	360	359	357	363
IXA	212	201	193	204	228
IXB	282	280	295	264	265
IXC	500	511	448	594	554
IXD	391	386	366	414	439
IXE	627	625	575	700	622
VA	493	495	498	503	465
VB	459	465	464	463	473
VIA	322	319	313	328	319
VIB	254	247	248	247	248
VIC	352	342	330	348	370
VIIA	251	249	248	251	240
VIIIA	212	209	212	208	203
VIIIB	241	236	236	235	235
XA	182	178	178	178	178

v případě několika geomorfologických oblastí k dispozici, a proto bylo nahrazeno posledním datumem období ZBYTEK. Překryvy období uvažovány nebyly, spíše bylo cíleno na delší charakter období.

Z několika důvodů, mezi něž patřilo i množství získaných dat determinované počtem geomorfologických oblastí, byl pro samotnou regresní analýzu nakonec vybrán lineární model (vícezměrný aditivní s odhadem parametrů pomocí metody obyčejných nejmenších čtverců) a model náhodných lesů. Terénní vysvětlující proměnné byly v prvním případě vybírány na základě Akaikeho

informačního kritéria (za kombinace dopředného a zpětného hledání proměnných; blíže viz [21, 22]). Výběr vysvětlujících proměnných konkrétně probíhal prostřednictvím funkce stepAIC implementované v R balíčku MASS, jenž je součástí knihy [23]. Před aplikací lineárních modelů byla speciálně zkoumána možná kolinearita mezi nabízenými vysvětlujícími proměnnými pomocí Pearsonových korelačních koeficientů. V případě náhodných lesů byl aplikován dopředný výběr pomocí funkce ffs implementované v R balíčku CAST [24–26], který ke svému fungování potřebuje především R balíčky caret [27, 28] a randomForest [29].

Tab. 6. Nejlepší lineární modely podle Akaikeho informačního kritéria
 Tab. 6. Best linear models according to the Akaike Information Criterion

	Koeficient/Coefficient	Odhad/Estimate	Střední chyba/Std. error	t	P(> t)
KOMPLET/ALL (2013–2021)	absolutní člen/intercept	-73,65	35,43	-2,08	0,05
($R^2 = 0,99$)	X	6×10^{-5}	5×10^{-5}	1,39	0,18
F = 297,5	MIN	0,22	0,09	2,61	0,02
p < 0,01)	MAX	0,12	0,05	2,65	0,02
	MEDIAN	0,75	0,07	10,16	< 0,01
	SD	0,81	0,27	2,97	0,01
	MEDSLOPE	-9,28	2,83	-3,28	< 0,01
AKUMULACE/ACCUMULATION (2018–2021)	absolutní člen/intercept	-701,23	536,17	-1,31	0,21
($R^2 = 0,99$)	Y	1×10^{-4}	1×10^{-4}	1,3	0,21
F = 174,7	MIN	0,35	0,1	3,52	< 0,01
p < 0,01)	MEDIAN	0,73	0,08	9,72	< 0,01
	SD	0,88	0,18	4,74	< 0,01
	MEDSLOPE	-4,79	3,05	-1,57	0,13
TÁNÍ/MELT (2018–2021)	absolutní člen/intercept	-229,44	95,66	-2,4	0,03
($R^2 = 0,99$)	X	3×10^{-4}	8×10^{-5}	3,41	< 0,01
F = 112,5	MIN	0,21	0,15	1,42	0,17
p < 0,01)	MAX	0,25	0,08	3,08	0,01
	MEDIAN	0,94	0,12	7,76	< 0,01
	SD	0,96	0,45	2,11	0,05
	MEDSLOPE	-16,43	7,28	-2,26	0,04
	MEANASPEast	53,18	28,32	1,88	0,08
	MEANASPSouth	90,72	30,27	3	0,01
	MEANASPWest	65,25	45,08	1,45	0,17
	SDASP	-63,21	37,96	-1,67	0,12
ZBYTEK/REST (2018–2021)	absolutní člen/intercept	-9,28	29,79	-0,31	0,76
($R^2 = 0,97$)	MAX	0,25	0,04	6,14	< 0,01
F = 115,2	MEDIAN	0,82	0,08	10,62	< 0,01
p < 0,01)	MEDSLOPE	-17,03	5,59	-3,04	0,01
	MEANASPEast	-9,63	21,8	-0,44	0,66
	MEANASPSouth	-29,39	26,61	-1,1	0,28
	MEANASPWest	86,3	43,79	1,97	0,06

t – kvantil Studentova t-rozdělení / Student t-distribution quantile; P – pravděpodobnost / probability; F – kvantil Fisherova-Snedecorova F-rozdělení / Fisher-Snedecor F-distribution quantile; p – p-hodnota / p-value

Tab. 7. Vysvětlující proměnné vybrané algoritmem podle [25] pro modely náhodných lesů
 Tab. 7. Explanatory variables selected by the algorithm of [25] for random forest models

Vysvětlující proměnná/ Explanatory variable	
KOMPLET/ALL (2013–2021)	MAX
($R^2 = 0,93$)	MEDIAN
RMSE = 45,79	X
RRMSE = 10,18)	
AKUMULACE/ACCUMULATION (2018–2021)	MEDIAN
($R^2 = 0,93$)	SD
RMSE = 40,44	MIN
RRMSE = 9,49)	
TÁNÍ/MELT (2018–2021)	MAX
($R^2 = 0,92$)	MEDIAN
RMSE = 61,09	SDASP
RRMSE = 12,5)	
ZBYTEK/REST (2018–2021)	MAX
($R^2 = 0,92$)	MEDIAN
RMSE = 49,4	X
RRMSE = 10,92)	

RMSE – odmocninová střední čtvercová chyba / root mean squared error
 RRMSE – relativní odmocninová střední čtvercová chyba / relative root mean squared error

úplná vícerozměrná řada mohla díky extrapolacím obsahovat též hodnoty větší než maximální a menší než minimální nadmořské výšky vyskytující se v geomorfologických oblastech, což v doplněných datech nastalo u 16 oblastí (jinými slovy u 1,3 % z celkového počtu denních hodnot). To ale při následujícím použití modelů pro zjišťování, které terénní charakteristiky mají vliv na variabilitu nadmořské výšky nulové izochiony, překážku nekladlo. Navíc tyto hodnoty by bylo možné považovat za reálné, kdyby např. nejvyšší partie oblastí dosahovaly odhadovaných pozic. Je rovněž předpokládáno, že tyto situace byly redukovány aplikováním alfa-useknutého průměru.

Před aplikováním lineárních modelů je doporučováno všimnout si zejména pravděpodobné kolinearity mezi vysvětlujícími proměnnými, tj. jevu, při němž dvě nebo více proměnných poskytují velmi podobnou informaci. Obr. 5 prostřednictvím Pearsonových korelací ukazuje, že i přes neúplný seznam terénních proměnných velmi pravděpodobně kolinearita v sadě vysvětlujících proměnných přítomna byla. Zejména si lze povšimnout velmi těsné (a statisticky významné korelace na hladině 0,05) mezi maximem nadmořské výšky a rozpětím mezi minimem a maximem. Dále je možné vyzorovat velmi těsný vztah mezi oběma veličinami vztahujícími se k orientaci svahů. Z těchto důvodů nebylo v případě lineárních modelů dále počítáno s rozpětím mezi maximem a minimem nadmořské výšky a s převažující orientací svahů. Alternativou (při ponechání všech dostupných vysvětlujících proměnných) mohly být regresní modely, v nichž jako vysvětlující proměnné figurují namísto původních proměnných hlavní komponenty (viz např. [34]). U modelů náhodných lesů byly

před výběrem záměrně ponechány všechny získané terénní vysvětlující proměnné. Poznamenejme ještě, že pro modely náhodných lesů bylo ponecháno původní nastavení parametrů jako např. v [35].

Tab. 6 a 7 již prozrazují, které terénní proměnné byly konkrétně vybrány pro lineární modely (za asistence Akaikeho informačního kritéria), respektive pro modely náhodných lesů (za pomoci dopředného algoritmu podle [25]). Je vidět, že lineární modely jsou mnohem komplexnější, pokud jde o inkluzi vysvětlujících proměnných. Některé proměnné dle statistiky t významné nejsou, ale i tak přispívají k významnosti celých modelů. Ty jsou dle statistiky F významné dokonce na menších hladinách než 0,05. Rovněž tak hodnoty koeficientů determinace (R^2) jasně naznačují, že vysvětlení variability dlouhodobé nadmořské výšky nulové izochiony je zde více než dobré. Za cenu snížení hodnot R^2 algoritmus u modelů náhodných lesů vybral vysvětlujících proměnných méně. Velmi často zde vystupuje zeměpisná délka a extrémy nadmořské výšky. Stálou vysvětlující proměnnou je tu charakteristika související se střední nadmořskou výškou geomorfologických oblastí, což potvrzuje situaci na obr. 4. Pro období akumulace a tání sněhu se zdají být důležitými také charakteristiky spjaté s variabilitou nadmořské výšky (v případě akumulace) a orientace svahů (v případě tání), což zní poměrně logicky. Je však třeba poznamenat, že náhodný les je model založený na resamplovacích technikách, takže při jiném běhu algoritmu může dojít k nepatrně odlišnému výběru proměnných. Domníváme se ale, že i tak by tyto výběry byly velice podobné. Např. pro tání sněhu bude důležitá variabilita orientace svahu, jež souvisí s příznivými nebo naopak nepříznivými podmínkami v průběhu světlé části dne.

Analýza trendů, a tedy meziroční časové variability nadmořské výšky nulové izochiony byla provedena jen pro nejdelší časovou řadu označenou jako KOMPLET, protože období čtyř let, pro které je k dispozici rozdělení podle jednotlivých fází přírůstku a úbytku sněhové pokrývky, není možné pro tento typ analýzy ještě považovat za reprezentativní. Z tab. 8 je jasné, že během zimních sezon 2013–2021 byla nulová izochiony spíše stabilní. Přesto je však možné si povšimnout, že v pěti regionech pravděpodobně dochází k poklesu (Podkrušnohorská oblast, Středočeská tabule, Severní Vněkarpatské sníženiny, Jihomoravská pánev) či vzestupu nulové izochiony (Krkonoško-jesenické podhůří). Důvody pro vznik takových trendů mohou být různé, od skutečných nárůstů či poklesů sněhové pokrývky až po fakt, že data pro některé z těchto regionů nemusela být dostatečná. Tak např. při pohledu na obr. 6, kde jsou černou čarou znázorněny průběhy časových řad jen pro regiony se signifikantním monotónním trendem, je zřejmé, že nejméně tři z těchto výsledků jsou dosti nevěrohodné. K situacím, kdy $R^2 = 1$, nedochází téměř nikdy. Navíc průběhy těchto podezřelých řad nevykazují téměř žádnou variabilitu (např. černé čáry jsou zakryty modrými regresními přímkami), což naznačuje, že spíše selhal EM algoritmus při doplňování chybějících hodnot, který pracoval pouze s několika málo zjištěnými hodnotami, jež mohly být nadto zatíženy velkou nejistotou. Doplňme, že zatímco v obr. 6 jsou regresní přímkou konstruovány za využití lineárních modelů, tak v tab. 8 jsou regresní koeficient a absolutní člen pro porovnání výsledků vztaženy k tzv. Senovu neparametrickému odhadu [36].

Pro účely aktualizace tabulky diferencí mezi nadmořskými výškami nulové izochiony v jednotlivých geomorfologických oblastech, kterou uvádí [3], byla sestavena její nová verze (viz tab. 9). Je patrné, že současné čísla se dosti odlišují od těch publikovaných v minulosti. Mohlo např. dojít k určitému zpřesnění, kde aplikovaný alfa-useknutý průměr již k extrémním hodnotám přihlížel jinak. Z praktického hlediska metodiky výpočtu zásob vody ve sněhu je však pro prognostiky ČHMÚ nejzásadnější vztah mezi horskými pohraničními regiony, kde se sněhová pokrývka vyskytuje nejdéle a nejčastěji. Nutné je ale zmínit i riziko významných jarních povodní z tajícího sněhu, jež je spjato spíše se sněhovou pokrývkou v nížinách, tzn. v tabulích v Polabí. V takových situacích je nulová izochiony buď zcela potlačena a sníh se vyskytuje na celém území, nebo je hranice poměrně ostrá a ohraničuje nejteplejší oblasti a tepelné ostrovy. Tab. 9 zkušenosti z analýz nulové izochiony jen potvrzuje, především pak

Tab. 8. Výsledky trendové analýzy pro všech 27 geomorfologických oblastí Česka (↑ : statisticky významný rostoucí trend na hladině 0,01; ↓ : statisticky významný klesající trend na hladině 0,01)

Tab. 8. Results of trend analysis for all 27 geomorphological regions of Czechia (↑ : statistically significant increasing trend at the 0.01 level; ↓ : statistically significant decreasing trend at the 0.01 level)

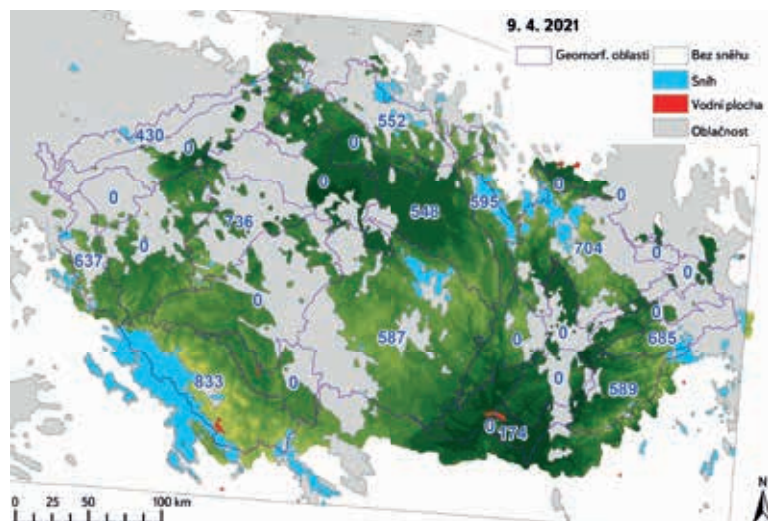
Oblast/Region	Kendalovo tau/ Kendall's tau	p-hodnota/ p-value	Senova směrnice/ Sen's slope	Absolutní člen/ Intercept	Grafické vyjádření trendu/ Graphical trend expression
IA	0,43	0,17	3,74	598,18	–
IB	0,14	0,71	4,06	782,19	–
IIA	-0,36	0,27	-1,01	456,15	–
IIB	-0,36	0,27	-0,25	439,8	–
IIC	-0,14	0,71	0,34	534,1	–
IID	0	1	1,69	447,65	–
IIIA	-0,14	0,71	3,3	674,8	–
IIIB	-0,79	< 0,01	-4,19	427,01	↓
IIIC	0,5	0,11	7,33	624,57	–
IVA	-0,29	0,39	0,23	657,84	–
IVB	-0,07	0,9	4,32	595,99	–
IVC	0	1	0,59	670,03	–
IVD	0,79	< 0,01	4,29	329,09	↑
IXA	-0,57	0,06	-4,39	236,98	–
IXB	-0,21	0,54	-3,3	301,42	–
IXC	0,14	0,71	4,65	469,41	–
IXD	-0,5	0,11	-1,1	401,11	–
IXE	-0,07	0,9	0,56	629,08	–
VA	-0,14	0,71	0,22	489,92	–
VB	0,29	0,39	1,27	451,72	–
VIA	-0,07	0,9	0,12	322,8	–
VIB	-1	< 0,01	-2,44	265,85	↓
VIC	-0,5	0,11	-3,48	368,05	–
VIIA	-0,43	0,17	-0,41	252,38	–
VIIIA	-0,29	0,39	-1,74	219,8	–
VIIIB	-1	< 0,01	-2,04	251	↓
XA	-1	< 0,01	-1,6	189,88	↓

nejpoužívanější vztah, a to ten mezi Krkonošskou oblastí a Šumavskou hornatinou. Ten je možné charakterizovat zjednodušeně tím, že sněhová pokrývka na Šumavě začíná vždy o 100 a více výškových metrů výše oproti hranici sněhu v Krkonoších. Důvody pro to lze spatřovat v členitosti místních regionů, kdy Krkonoše reprezentují spíše strmé svahy a českou část Šumavy naopak pozvolnější přechod do nižších oblastí.

Obr. 7 demonstruje příklad výstupu získaného pomocí snímků MODIS a zároveň dokumentuje podmínky úbytku sněhové pokrývky začátkem dubna 2021. Je zde zobrazena nejčastější situace, kdy je sněhová pokrývka přítomna jen v nejvyšších polohách hor, kde je navíc částečně překryta oblačností. Naopak v nížinách už sníh neleží vůbec, stejně jako se na konci zimy již nevyskytují nejisté definovatelná území se sněhem, jež charakterizuje kód 201 (viz tab. 1).

Tab. 9. Rozdíly mezi dlouhodobými průměry nadmořské výšky nulové izochiony za zimní období (listopad–květen) napříč všemi 27 geomorfologickými oblastmi Česka
 Tab. 9. Differences between long-term averages of the zero isochion altitude for winter seasons (November–May) across all 27 geomorphological regions of Czechia

	IA	IB	IIA	IIB	IIC	IID	IIIA	IIIB	IIIC	IVA	IVB	IVC	IVD	IXA	IXB	IXC	IXD	IXE	VA	VB	VIA	VIB	VIC	VIIA	VIIIA	VIIIB	XA	
IA	0																											
IB	-194																											
IIA	163	356	0																									
IIB	176	369	12	0																								
IIC	77	273	-84	0																								
IID	165	357	1	-11	-99	0																						
IIIA	-80	110	-249	-260	-165	-247	0																					
IIIB	207	401	45	35	130	46	285	0																				
IIIC	-48	147	-211	-224	-124	-211	34	-254	0																			
IVA	-41	151	-205	-212	-118	-202	37	-245	11	0																		
IVB	-2	189	-165	-173	-80	-163	80	-209	48	34	0																	
IVC	-71	116	-233	-243	-146	-230	10	-272	-23	-35	-72	0																
IVD	266	461	102	88	189	102	351	56	314	306	266	340	0															
IXA	404	596	235	227	324	237	488	191	452	441	402	470	137	0														
IXB	333	525	167	157	252	165	415	120	380	367	328	397	69	-71	0													
IXC	116	314	-49	-60	38	-46	200	-90	159	154	117	185	-153	-282	-212	0												
IXD	220	415	60	48	146	60	305	13	268	260	221	285	-45	-181	-106	104	0											
IXE	-10	187	-178	-188	-88	-175	83	-218	39	37	-4	69	-275	-414	-345	-231	0											
VA	116	311	-41	-54	43	-42	200	-87	165	157	123	186	-146	-281	-210	4	-102	132	0									
VB	156	349	-10	-20	76	-7	236	-54	203	192	157	223	-110	-245	-178	40	-69	168	36	0								
VIA	294	486	130	117	215	129	377	83	342	330	293	358	29	-109	-41	176	68	304	168	137	0							
VIB	362	554	196	186	285	196	445	150	410	398	358	428	98	-41	28	246	138	373	239	205	69	0						
VIC	265	457	99	87	182	95	347	56	310	301	264	326	1	-141	-70	142	40	272	143	108	-29	-98	0					
VIIA	366	558	199	188	288	201	450	153	413	401	362	433	100	-39	31	251	140	377	243	209	72	3	102	0				
VIIIA	403	594	235	227	325	236	485	188	450	438	399	469	138	0	67	285	178	415	280	244	108	41	139	37	0			
VIIIB	375	567	208	198	298	209	458	163	423	410	371	441	110	-28	41	259	151	386	252	218	82	13	111	10	-28	0		
XA	434	626	267	257	357	268	517	222	482	469	430	500	169	31	100	318	209	445	311	277	140	72	170	69	31	59	0	0



Obr. 7. Analyzovaná situace z 9. dubna 2021, kde jsou vybrané třídy dle tab. 1 zobrazeny nad podkladem DMR (hodnoty určují průměrnou polohu nulové izochiony v m n. m. a 0 znamená oblast bez zaznamenané nulové izochiony)

Fig. 7. Analyzed situation on 9th April 2021 where the selected classes from tab. 1 are depicted above the digital elevation model (values determine the average position of the zero isochion in m a.s.l. and 0 determines the area without recorded zero isochion)

ZÁVĚR

V příspěvku jsou uvedeny aktualizované poznatky týkající se nadmořské výšky nulové izochiony, tedy čáry představující hranici mezi prostorem se sněhem a prostorem bez sněhu, ve 27 geomorfologických oblastech Česka, které se v praxi hydrologie ČHMÚ využívají pro odhad vodní hodnoty sněhu. Jelikož sníh představuje významnou komponentu tvořící odtok na území Česka, je tato aktivita nezbytná před spuštěním hydrologických modelů používaných v ČHMÚ jak pro operativní účely, tak i pro bilanční výpočty. Terénní průzkum je finančně i časově nákladný, a navíc neposkytuje dostatečně detailní představu o prostorovém rozložení sněhu v regionech, v Česku často výškově dosti členitých. Proto se pro zpřesnění této představy úspěšně využívají družicové snímky, které po vhodné kalibraci pomocí dat sebraných v terénu mohou být velmi nápomocny i při určení hranice mezi regionem se sněhem a bez sněhu (viz např. [1] a [37]). Studie tak navázala na předchozí výzkum a za využití prodloužené časové řady nadmořských výšek nulové izochiony do května 2021 se snažila odpovědět na otázky nastíněné v závěrech práce [3]. Především byla studována prostorová variabilita nadmořské výšky nulové izochiony a prostřednictvím regresních modelů bylo zjišťováno, na kterých faktorech souvisejících s terénem (určených v prostředí GIS z DMR vycházejícího z díla DMÚ 25) závisí kolísání nulové izochiony nejvíce. Za reprezentativní vysvětlovanou proměnnou zde byl brán alfa-useknutý průměr vypočtený z denních hodnot, u něhož bylo předpokládáno, že redukuje vliv nejistoty v určení polohy nulové izochiony. Průměr nadmořské výšky nulové izochiony v jednotlivých regionech navíc do určité míry představuje limitní polohu, pod kterou již nelze v interpolačních procesech očekávat nenulovou (kladnou) hodnotu výšky sněhové pokrývky a potažmo i vodní hodnoty sněhu. Vzhledem k nejistotám spjatým se snímky MODIS se domníváme, že pokud bude odvozování nulové izochiony vhodně kombinováno s interpolací hodnot získaných pozemním měřením, může část těchto nejistot být do značné míry redukována. Zde sestavené regresní modely vysvětlující prostorovou variabilitu mohou být tedy velmi užitečné např. při odhadu (průměrné) pozice nulové izochiony v situacích, kdy jsou regiony z převážné většiny zakryté oblačností. Bylo zjištěno, že velký vliv mají střední, ale i extrémní hodnoty nadmořských výšek. Svůj podíl má zřejmě i zeměpisná

délka. V případě akumulace sněhu se k vysvětlujícím proměnným v regresních modelech přidává také směrodatná odchylka vypočítaná z nadmořských výšek vyskytujících se v dané geomorfologické oblasti. V případě tání sněhu se zdá být významná směrodatná odchylka získaná ze všech úhlů určujících orientaci svahů. Studium časové variability nadmořské výšky nulové izochiony bylo provedeno trendovou analýzou s cílem zjistit, zda lze vypořádat přítomnost monotónních deterministických trendů. Aby byl redukován vliv autokorelace, byla přitom aplikována TFPW modifikace Mannova–Kendallova testu. Z výsledků vyplývá, že v průběhu zimních sezon se sněhová pokrývka, a tím i nulová izochiony, chová stabilně. Pouze v pěti geomorfologických jednotkách byl nalezen statisticky významný meziroční trend. Výsledky analýz je ale třeba interpretovat opatrně. Tak např. u tří oblastí vyšel koeficient determinace podezřele roven jedné, což je jev velmi vzácný. Spíše než na skutečnost tento fakt poukazuje na to, že při doplňování chybějících hodnot nadmořské výšky nulové izochiony využitý EM (Expectation-Maximization) algoritmus v některých případech selhal. Důvodem byl nedostatek informací, což bylo jistě způsobeno malým množstvím dat získaných ze snímků MODIS, respektive odvozených produktů.

Jak bylo naznačeno výše, na jaře 2022 má dojít k dokončení revizí produktu vycházejícího z indexu NDSI. Tím by mohlo v ČHMÚ následně proběhnout jakési ověření, zda jsou vztahy představené v tomto příspěvku stále platné. Přirozeně se nabízí nasazení (polo)automatického zpracování dat pocházejících ze snímků MODIS za předpokladu, že pracovníci ČHMÚ prohloubí své skriptovací znalosti. Velmi doporučováno je prodloužení časové řady směrem do historie s uvážením, že produkty spojené s detekcí sněhu na zemském povrchu jsou k dispozici již od roku 2000. Nabízí se také „zahuštění“ dat s ohledem na skutečnost, že snímky MODIS mají mnohem jemnější časový krok než jeden týden. To může umožnit i aplikaci sofistikovanějších modelů časových řad, než je pouhá analýza trendu. Přesnější se tak představa o časové dynamice nulové izochiony, pokud i na straně vysvětlujících proměnných nebudou jen charakteristiky terénu, ale i řady klimatologických prvků. Vysvětlení rozdílů v poloze nulové izochiony lze totiž hledat též v rozdílu klimatických podmínek, především ve výskytu srážkových situací, jež ovlivňují převážně jihozápad území Česka, přičemž směrem k severním pohořím již nedosahují takových intenzit. Za úvahu rovněž stojí podívat se na další charakteristiky související s nulovou izochionou, které mohou do modelů vstupovat jako vysvětlované proměnné. Zajímavou informací může hydrologům poskytnout např. gradient změny nulové izochiony nebo změna délky setrvání nulové izochiony nad určitou výškovou hranicí. Podobné ukazatele byly studovány již v [38] a zejména na období tání sněhu a jeho vliv na odtok byla zaměřena studie [39]. Za zmínku stojí rovněž metoda, již je v těchto publikacích nulová izochiony extrahována. Tato metoda se totiž liší od metodiky prezentované zde, a proto se tu přirozeně nabízí srovnání obou přístupů za využití dat pro území Česka.

Zásadním limitem pro přesnější definici polohy nulové izochiony zůstává prostorové rozlišení analyzovaného gridu (500 m). Pro hlubší implementaci nulové izochiony do výpočtu zásob vody ve sněhu je tedy vedle automatizace procesů nutné i prostorové zpřesnění. Jednou z možností by mohla být diferenciací reklasifikace produktů s hodnotami indexu NDSI podle různých faktorů, která se dle příspěvku [40] osvědčila na území Rakouska. Podmínkou však je, že délka odvození nulové izochiony bude vyhovovat požadavku operativní hydrologie ČHMÚ mít tento výsledek do 24 hodin. Aktuálně existují i přesnější prostorová data, ovšem opět se značným časovým prodloužením mezi jejich pořízením a dostupností. Jistý příslib v horizontu této dekády lze spatřovat v lokálních pozorovacích systémech či v evropském programu Copernicus s misemi *Sentinel* (viz např. [41]). Neméně důležitým úkolem bude zajisté studium vlastností sněhové pokrývky separátně pro fáze akumulace, tání a ve zbytku zimní sezony, protože – jak výsledky této studie ukázaly – toto dělení má smysl.

V neposlední řadě se naskytá otázka, zda není prostřednictvím snímků MODIS výhodnější mapovat plochu sněhové pokrývky přímo. To by bylo možné pouze při ideálních podmínkách za bezoblačnosti, kdy je zaručen

přehled o celém území Česka, nebo alespoň o všech oblastech se sněhovou pokrývkou. Takových situací je ve skutečnosti pouze minimum, řádově jednotky dní během sezony. Z tohoto důvodu nemůže být aktuálně snímkování MODIS implementováno do výpočtů plochy se sněhovou pokrývkou jako pravidelně používaný nástroj, ale jen jako doplněk k informacím získaným z poměrně husté sněhoměrné sítě ČHMÚ. Naopak jistý potenciál lze najít právě v kalibraci modelu vycházejícího z dostupných řad nadmořské výšky nulové izochiony a jeho schopnosti predikovat pro „neviditelná“ místa.

Poděkování

Oba autoři jsou podpořeni v rámci tzv. *Dlouhodobé koncepce rozvoje výzkumné organizace (DKRVO) ČHMÚ. Práce O. Ledvinky statistického charakteru je navíc účelově podpořena Technologickou agenturou České republiky (projekt SSO1020366 „Využití dat dálkového průzkumu Země pro posouzení negativních dopadů přivalových srážek“). Autoři za tuto podporu vyslovují své díky.*

Literatura

- [1] BERCHA, Š. Vyhodnocování zásob vody ve sněhové pokrývce v ČHMÚ. In: KIMLOVÁ, M., ŘIČICOVÁ, P., BERCHA, Š. (eds.). *XXI. stretnutie snehárov: sborník příspěvků ze semináře: Žitková 1.–3. 3. 2016 + vybrané nevydané příspěvky z předchozích setkání* [on-line]. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 2017, s. 55–56. ISBN 978-80-87577-75-2. Dostupné z: <http://www.uh.sav.sk/en-gb/Research/Conferences/Snow-Meetings>
- [2] ČHMÚ. Hlásná a předpovědní povodňová služba. *Informace o velikosti sněhových zásob na území České republiky* [on-line]. 4. květen 2021 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: <https://www.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/CB/snih/aktual.htm>
- [3] DUCHÁČEK, L. Vertikální variabilita nulové izochiony v rámci geomorfologických oblastí Česka. *Geografie* [on-line]. 2014, 119(2), s. 145–160. ISSN 1212-0014, 2571-421X. Dostupné z: doi: 10.37040/geografie2014119020145
- [4] Česká meteorologická společnost. Meteorologický slovník. *Elektronický meteorologický slovník* [on-line]. 2017 [vid. 25. listopad 2021]. Dostupné z: <http://slovník.cmes.cz/>
- [5] NASA NSIDC. *About Us | National Snow and Ice Data Center* [on-line]. 2021 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: <https://nsidc.org/about/overview>
- [6] HALL, D. K., RIGGS, G. A. *MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m, Version 61* [on-line]. B.m.: NASA National Snow and Ice Data Center DAAC. 2021 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: doi: 10.5067/MODIS/MOD10_L2.061
- [7] *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* [on-line]. 2021 [vid. 26. listopad 2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Moderate_Resolution_Imaging_Spectroradiometer&oldid=1048616305
- [8] NASA. *Terra Spacecraft | NASA* [on-line]. 4. srpen 2017 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/terra/spacecraft/index.html
- [9] *Hierarchical Data Format* [on-line]. 2021 [vid. 26. listopad 2021]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hierarchical_Data_Format&oldid=1049571370
- [10] NASA. *HEG: HDF-EOS to GeoTIFF Conversion Tool – Data Access Services – Earthdata Wiki* [on-line]. 22. duben 2019 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: <https://wiki.earthdata.nasa.gov/display/DAS/HEG%3A++HDF-EOS+to+GeoTIFF+Conversion+Tool>
- [11] BOHÁČ, P., KOLÁŘ, J. *Vyšší geomorfologické jednotky České republiky*. Praha: Český úřad zeměměřičký a katastrální, 1996. Geografické názvoslovné seznamy OSN – ČR, A1. ISBN 978-80-901212-7-0.
- [12] ČÚZK. ČÚZK: Geoportál. *Data200* [on-line]. 20. leden 2020 [vid. 23. listopad 2021]. Dostupné z: [https://geoportal.cuzk.cz/S\(eew4l3agpixe2uphizmoaed\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy_data200&text=dSady_mapyData200&head_tab=sekce-02-gp&menu=229](https://geoportal.cuzk.cz/S(eew4l3agpixe2uphizmoaed)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=mapy_data200&text=dSady_mapyData200&head_tab=sekce-02-gp&menu=229)
- [13] MARDIA, K. V. *Statistics of Directional Data*. London, New York: Academic Press, 1972. Probability and Mathematical Statistics. ISBN 978-0-12-471150-1.
- [14] AGOSTINELLI, C., LUND, U. *R Package „Circular“: Circular Statistics* [on-line]. 2017. Dostupné z: <https://r-forge.r-project.org/projects/circular/>
- [15] PEBESMA, E. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *The R Journal* [on-line]. 2018, 10(1), s. 439–446. ISSN 2073-4859. Dostupné z: doi: 10.32614/RJ-2018-009
- [16] HIJMANS, R. J. *Terra: Spatial Data Analysis* [on-line]. 2021. Dostupné z: <https://CRAN.R-project.org/package=terra>
- [17] VIO, R., WAMSTEKER, W. Tests of Irregularly Sampled Stochastic Time Series for AGN. In: MAOZ, D., STERNBERG, A., LEIBOWITZ, E. M. (eds.). *Astronomical Time Series: Proceedings of The Florence and George Wise Observatory 25th Anniversary Symposium held in Tel-Aviv, Israel, 30 December 1996–1 January 1997* [on-line]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1997, s. 167–170 [vid. 8. červen 2019]. Astrophysics and Space Science Library, 218. ISBN 978-90-481-4895-0. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-94-015-8941-3>
- [18] JUNGER, W. L., PONCE DE LEON, A. Imputation of Missing Data in Time Series for Air Pollutants. *Atmospheric Environment* [on-line]. 2015, 102, s. 96–104. ISSN 1352-2310. Dostupné z: doi: 10.1016/j.atmosenv.2014.11.049
- [19] JUNGER, W., PONCE DE LEON, A. *Mtsdi: Multivariate Time Series Data Imputation* [on-line]. 2018. Dostupné z: <https://CRAN.R-project.org/package=mtsdi>
- [20] ZVÁRA, K. *Základy statistiky v prostředí R*. Praha: Karolinum, 2013. Biomedicínská statistika, IV. ISBN 978-80-246-2447-1.
- [21] AKAIKE, H. A New Look at the Statistical Model Identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* [on-line]. 1974, 19(6), s. 716–723. ISSN 0018-9286. Dostupné z: doi: 10.1109/TAC.1974.1100705
- [22] KUTNER, M. H., NACHTSHEIM, Ch. J., NETER, J., LI, W. *Applied Linear Statistical Models*. 5th ed. Boston: McGraw-Hill/Irwin, 2005. Operations and Decision Sciences. ISBN 0-07-238688-6.
- [23] VENABLES, W. N., RIPLEY, B. D. *Modern Applied Statistics with S*. 4th ed. New York: Springer, 2002. Statistics and Computing. ISBN 978-0-387-95457-8.
- [24] MEYER, H. *CAST: „Caret“ Applications for Spatial-Temporal Models* [on-line]. 2021. Dostupné z: <https://CRAN.R-project.org/package=CAST>
- [25] MEYER, H., REUDENBACH, Ch., HENGL, T., KATURJI, M., NAUSS, T. Improving Performance of Spatio-Temporal Machine Learning Models Using Forward Feature Selection and Target-Oriented Validation. *Environmental Modelling & Software* [on-line]. 2018, 101, s. 1–9. ISSN 1364-8152. Dostupné z: doi: 10.1016/j.envsoft.2017.12.001
- [26] MEYER, H., REUDENBACH, Ch., WÖLLAUER, S., NAUSS, T. Importance of Spatial Predictor Variable Selection in Machine Learning Applications – Moving from Data Reproduction to Spatial Prediction. *Ecological Modelling* [on-line]. 2019, 411, 108815. ISSN 0304-3800. Dostupné z: doi: 10.1016/j.ecolmodel.2019.108815
- [27] KUHN, M. *Caret: Classification and Regression Training*. [on-line]. 2021. Dostupné z: <https://CRAN.R-project.org/package=caret>
- [28] KUHN, M., JOHNSON, K. *Applied Predictive Modeling* [on-line]. New York, NY: Springer New York, 2013 [vid. 15. září 2020]. ISBN 978-1-4614-6848-6. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4614-6849-3>
- [29] LIAW, A., WIENER, M. Classification and Regression by RandomForest. *R News*. 2002, 2(3), s. 18–22. ISSN 1609-3631.
- [30] BRONAUGH, D., WERNER, A. *Zyp: Zhang + Yue-Pilon Trends Package* [online]. B.m.: Pacific Climate Impacts Consortium, 2019. Dostupné z: <https://CRAN.R-project.org/package=zyp>
- [31] KENDALL, M. G. A New Measure of Rank Correlation. *Biometrika* [on-line]. 1938, 30(1), s. 81–93. ISSN 0006-3444. Dostupné z: doi: 10.2307/2332226
- [32] MANN, H. B. Nonparametric Tests against Trend. *Econometrica* [on-line]. 1945, 13(3), s. 245–259. ISSN 0012-9682. Dostupné z: doi: 10.2307/1907187
- [33] KENDALL, M. G., GIBBONS, J. D. *Rank Correlation Methods*. 5th ed. New York: Oxford University Press, 1990. ISBN 978-0-19-520837-5.
- [34] WILKS, D. S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences* [on-line]. 4th ed. Amsterdam: Elsevier, 2019 [vid. 1. říjen 2019]. ISBN 978-0-12-815823-4. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20170039216>
- [35] MAŤAŠOVSKÁ, V., KOTHAN, F., LEDVINKA, O., PUMANN, P., FOJTÍK, T., MAKOVCOVÁ, M., BENDAKOVSKÁ, L. Využití metod dálkového průzkumu Země pro monitoring stavu koupacích míst. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace* [on-line]. 2021, 63(1), s. 37–45. ISSN 0322-8916. Dostupné z: doi: 10.46555/VTEI.2020.12.003
- [36] SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association* [on-line]. 1968, 63(324), s. 1379–1389. ISSN 0162-1459. Dostupné z: doi: 10.2307/2285891
- [37] DENG, G., TANG, Z., HU, G., WANG, J., SANG, G., LI, J. Spatiotemporal Dynamics of Snowline Altitude and their Responses to Climate Change in the Tianshan Mountains, Central Asia, during 2001–2019. *Sustainability* [on-line]. 2021, 13(7), 3992. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi: 10.3390/su13073992
- [38] KRAJČÍ, P., HOLKO, L., PARAJKA, J. Variability of Snow Line Elevation, Snow Cover Area and Depletion in the Main Slovak Basins in Winters 2001–2014. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [on-line]. 2016, 64(1), s. 12–22. ISSN 0042-790X. Dostupné z: doi: 10.1515/johh-2016-0011
- [39] PARAJKA, J., BEZAK, N., BURKHART, J., HAUSSON, B., HOLKO, L., HUNDECHA, Y., JENICEK, M., KRAJČÍ, P., MANGINI, W., MOLNAR, P., RIBOUST, P., RIZZI, J., SENSOY, A., THIREL, G., VIGLIONE, A. MODIS Snowline Elevation Changes during Snowmelt Runoff Events in Europe. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* [on-line]. 2019, 67(1), s. 101–109. ISSN 0042-790X. Dostupné z: doi: 10.2478/johh-2018-0011
- [40] TONG, R., PARAJKA, J., KOMMA, J., BLÖSCHL, G. Mapping Snow Cover from Daily Collection 6 MODIS Products over Austria. *Journal of Hydrology* [on-line]. 2020, 590, 125548. ISSN 0022-1694. Dostupné z: doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125548
- [41] Koordinační rada ministra dopravy pro kosmické aktivity. Informační stránky Koordinační rady ministra dopravy pro kosmické aktivity. *Mapová aplikace | CollGS* [on-line]. 2021 [vid. 26. listopad 2021]. Dostupné z: <https://collgs.czechspaceportal.cz/mapova-aplikace/>

Autoři

Mgr. Libor Ducháček¹

✉ libor.duchacek@chmi.cz
ORCID: 0000-0001-6646-3399

Mgr. Ondřej Ledvinka, Ph.D.²

✉ ondrej.ledvinka@chmi.cz
ORCID: 0000-0002-0203-7064

¹Český hydrometeorologický ústav, oddělení aplikované hydrologie, Jablonec nad Nisou

²Český hydrometeorologický ústav, oddělení hydrofondu a bilancí, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2021.11.004

ZERO ISOCHION IN THE FRAMEWORK OF GEOMORPHOLOGICAL REGIONS IN CZECHIA: ITS EXTRACTION FROM THE MODIS IMAGERY AND ITS DYNAMICS

DUCHACEK, L.¹; LEDVINKA, O.²

¹Czech Hydrometeorological Institute, Applied Hydrology Department, Jablonec nad Nisou

²Czech Hydrometeorological Institute, Hydrology Database and Water Budget Department, Prague

Keywords: remote sensing – geographical information systems (GIS) – snow cover – snow water storage – CHMI hydrology – geomorphology of Czechia

Since December 2012, during every winter season, the altitude of the zero isochion (snowline) has been determined at the Czech Hydrometeorological Institute for the purposes of operational hydrology. The reason is the estimation of the amount of water stored in snow cover, which is inevitable activity for Czech hydrologists who naturally want their forecasting models to give relevant results. In order to get better idea about current spatial distribution of snow cover in Czechia, the information on the zero isochion has been extracted from the MODIS imagery coming from the Terra satellite. The obtained time series represents a relatively long period (currently until May 2021), which offers the possibility of analyzing the spatial and temporal dynamics of the zero isochion in Czechia. In this study, the information about the isochion was divided into 27 geomorphological regions, while the winter season also into the accumulation period and the melting period. The focus was on possible differences between individual regions and time periods, as well as on relationships between zero isochion dynamics and selected factors derived from other geographical data, such as digital elevation model. Due to different reasons, the data on the isochion were incomplete and did not satisfy the requirements for fitting the models which need regularly/evenly spaced sampling. Therefore, missing daily values were estimated so that the series finally covered the winter seasons from November to May. This was accomplished by the application of a suitable modified EM algorithm that respected both the temporal and the spatial structure of the multivariate time series. Correlation and regression analyses followed, where the main aim was to find out if the belonging to a geomorphological region (with its selected attributes) has an influence, and if there are significant interannual changes.